

Índice

1. RESUMO	4
ABSTRACT	5
2. INTRODUÇÃO	7
2.1. Geologia Regional	8
2.1.1. Província Mantiqueira	8
2.1.2. Faixa Brasília	9
2.1.3. Nappe Socorro-Guaxupé	10
3. OBJETIVOS	11
4. TRABALHOS PRÉVIOS	11
5. MÉTODOS	14
5.1. Preparo de concentrado de zircão	14
5.2. Teste químico de pureza dos concentrados	15
5.3. Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS)	16
5.4. Datação U-Pb	17
6. RESULTADOS OBTIDOS	17
7.1. Petrografia Macroscópica	17
7.1.1. Sienitos	18
7.1.2. Enclaves máficos	18
7.2. Petrografia Microscópica	18
7.2.1. Unidade Supersaturada Interna (SSI)	18
7.2.2. Unidade Laminada Supersaturada (SLS)	21
7.2.3. Unidade Saturada a Insaturada (SLSI)	22
7.2.4. Enclaves	24
7.2.5. Corpo máfico externo (PB-170)	25
7.3. Química de elementos traço em minerais acessórios	26
7.3.1. Apatitas	26
7.3.1. Titanita	28
7.3.2. Zircão	33
7.4. Geocronologia U-Pb em zircão	36
8. DISCUSSÃO	36
8.1. Condições de oxidação a partir da composição da apatita e zircão	36

8.2	Temperaturas de cristalização do zircão	43
8.3	Temperatura de cristalização de titanita	44
8.4	Evolução composicional do zircão e da titanita	48
8.5	Integração dos Dados.....	55
9	CONCLUSÃO	56
10	REFERÊNCIAS	58
ANEXO FOTOGRÁFICO - ANEXO I.....		60
TABELAS DE RESULTADOS DE QUÍMICA MINERAL – ANEXO II.....		62
TABELAS DE CÁLCULO DAS RAZÕES (Ce/Ce*) e (Eu/Eu*) – ANEXO III		66
TABELA COMPLETA – RESULTADOS DATAÇÃO U-PB – ANEXO IV.....		69

1. RESUMO

O Sienito Pedra Branca é composto por rochas de composição metaluminosa a peralcalina, com idade de 595 ± 6 Ma, formado por quatro unidades sieníticas distintas, sendo elas: Sienito Laminado Saturado a Insaturado (SLSI), de caráter peralcalino, Sienito Laminado Supersaturado (SLS), de caráter metaluminoso, Sienito Supersaturado Interno, e a unidade de Sienito Supersaturado Externo (SSE), as duas ultimas também apresentando caráter metaluminoso.

O trabalho procurou focar na caracterização das três principais unidades: SLSI, SLS e SSI. A unidade SLSI é caracterizada pela presença de piroxênio sódico (egirina-augita), refletindo seu caráter peralcalino, além de minerais acessórios, como titanita e apatita, extremamente bem desenvolvidos. A unidade SLS é caracterizada pela presença de diopsídio (piroxênio cálcico), e apresentar os minerais acessórios (apatita, titanita e zircão) com o maior enriquecimento em ETRs (principalmente ETRs pesados) em relação às demais unidades. A unidade supersaturada interna (SSI) é caracterizada pela presença de ortopiroxênio (enstatita) e ausência de titanita.

Três diferentes métodos foram aplicados em busca de caracterizar as condições de cristalização das diferentes unidades do plúton, entre eles, dois métodos de thermobarometria (Zr em Titanita e Ti em Zircão) e um método para o estudo das condições redox das unidades (Mn em apatita). O método de Mn em apatita se mostrou ineficiente quando aplicado dentro do contexto geoquímico do plúton Pedra Branca, visto que a aplicação do método pressupõe o uso em sistemas com sílica em excesso, o que não ocorre em nenhuma unidade estudada. Ainda assim foi possível caracterizar, de maneira qualitativa, as diferenças em condições de oxidação entre as unidades estudadas a partir do uso das razões (Ce/Ce^*) e (Eu/Eu^*) e concluiu-se que as condições de oxidação foram ficando progressivamente mais reduzidas da borda para o centro do plúton, visto que a unidade SLSI (borda do plúton) apresenta razões ($Eu/Eu^* > 0.90$ e $Ce/Ce^* < 1.10$) enquanto que a unidade SSI (unidade central) apresenta razões ($Eu/Eu^* < 0.70$ e $Ce/Ce^* > 1.10$).

Os outros dois métodos aplicados se mostraram eficientes possibilitando a caracterização das temperaturas de cristalização tanto da titanita quanto do zircão para cada unidade, resultando em temperaturas médias de $\sim 740^\circ\text{C}$, para as titanitas da unidade SLS, $\sim 844^\circ\text{C}$, para as titanitas da unidade SLSI e temperaturas de cristalização de zircão de $\sim 844^\circ\text{C}$, para a unidade SLSI, e de $\sim 861^\circ\text{C}$ para a unidade SLS. O intervalo de cristalização registrado, tanto da titanita quanto do zircão, se mostrou pequeno, em torno de 50°C entre as maiores e menores temperaturas calculadas em todas as unidades. É importante ressaltar também que as temperaturas calculadas para titanita e zircão, apresentadas no trabalho, não correspondem ao início de cristalização do

magma (T líquido), mas aos intervalos de cristalização das duas fases minerais mencionadas. A temperatura de início de cristalização de sienitos das unidades SLSI e SSI do plúton, a partir da saturação de apatita (mineral precoce em todas as unidades), foram estimadas em 1091°C e 1065°C respectivamente.

ABSTRACT

The Sienito Pedra Branca is composed of rocks of peralkaline to metaluminous composition, with an age around 595 ± 5.7 Ma, formed by four distinct syenitic units, namely: Laminated Silica Saturated (LSS), of peralkaline character, Laminated Silica-Oversaturated (LSO), Central Silica-Oversaturated (CSO) and External Silica-Oversaturated (ESO), the latter three exhibiting a metaluminous character.

The work sought to focus on the characterization of the three main units of the Pedra Branca pluton, being: LSS, LSO and CSO units. The LSS unit is characterized by the presence of sodium pyroxene (aegirine-augite), reflecting its peralkaline character, as well as accessory minerals such as titanite and apatite, extremely well developed, enriched mainly in rare earth elements. The LSO unit is characterized by the presence of diopside (calcium-magnesium pyroxene), as well as accessory minerals (apatite, titanite and zircon) with the highest enrichment in REE among all units studied. The central silica-oversaturated unit (CSO) is characterized by the presence of orthopyroxene (enstatite) and absence of titanite in its composition.

Three different methods were applied to characterize the crystallization conditions of the different pluton units, including two thermobarometry methods (Zr in Titanite and Ti in Zircon) and a method for the study of the redox conditions of the units (Mn in apatite). The method of Mn in apatite was inefficient when applied within the geochemical context of the Pedra Branca pluton, since the application of the method presupposes the use in systems with excess silica, which does not occur in any studied unit. Nevertheless, it was possible to characterize, in a qualitative way, the differences in oxidation conditions between the studied units using the (Ce / Ce^*) and (Eu / Eu^*) ratios, and it was concluded that the oxidation conditions were progressively getting less oxidizing from the outer units to the inner units, since the LSS unit showed ratios of $(Eu / Eu^* > 0.90)$ e $Ce / Ce^* < 1.10$, while the CSO unit showed ratios of $(Eu / Eu^* < 0.70)$ e $Ce / Ce^* > 1.10$.

The other two methods were efficient to characterize the crystallization temperatures of both titanite and zircon for each unit, resulting in mean temperatures of $\pm 740^\circ\text{C}$ for titanites of the SLS unit $\pm 844^\circ\text{C}$ for titanites of the SLSI unit and zircon crystallization temperatures of $\pm 844^\circ\text{C}$ for the SLSI unit and $\pm 861^\circ\text{C}$ for the SLS unit. The crystallization interval of both titanite and zircon

was proven to be quite small, around 50 °C between the highest and lowest temperatures calculated amongst all units. It is also important to note that the calculated temperatures for titanite and zircon, presented in this paper, do not represent the initial crystallization temperature of the magma, it represents the crystallization temperatures of the two mineral phases mentioned (zircon and titanite). The initial crystallization temperatures of the Pedra Branca pluton was calculated by other authors, based on the saturation temperature of apatite (early phase mineral in all units), some of the results include temperatures of 1091 °C for the LSS unit and 1065 °C for the CSO unit.

2. INTRODUÇÃO

O Sienito Pedra Branca é composto principalmente por rochas sieníticas potássicas, de caráter metaluminoso a peralcalino. Uma peculiaridade da ocorrência é a coexistência de sienitos supersaturados e sienitos saturados a insaturados em sílica. Todas as unidades que compõem o Sienito Pedra Branca apresentam características geoquímicas peculiares, como o forte enriquecimento em elementos litófilos e terras raras leves (Carvalho, 2011).

Estudos anteriores (Carvalho e Janasi, 2012) mostraram que as rochas do Sienito Pedra Branca registram temperaturas líquidas elevadas (1060 - 1090°C) e condições redox bastante variáveis (em geral acima do tampão NNO), indicadas por geotermômetros e geobarômetros baseados nas composições dos minerais principais.

A literatura mais recente tem demonstrado que essas estimativas também podem ser obtidas de maneira bastante precisa com base na composição química de minerais acessórios como apatita, zircão e titanita.

A concentração de elementos sensíveis a mudanças nas condições de oxidação do magma, como manganês (Mn), ferro (Fe), európio (Eu) e cério (Ce), em minerais acessórios oferece grande potencial na obtenção de estimativas mais precisas das condições de cristalização de magmas de diferentes composições (Miles et al, 2014).

Para realizar as estimativas das condições de cristalização, foram obtidas análises da concentração de manganês em apatita e ETRs (elementos terras raras) em zircão, além de análises de zircônio em titanita.

Zircão é amplamente utilizado em estudos, tanto geocronológicos quanto geoquímicos, devido a sua abundância no registro geológico, assim como sua habilidade de preservar as características químicas do momento de sua cristalização. No presente trabalho, serão analisadas por LA-ICP-MS (in situ) as concentrações de elementos terras raras (ETRs) em concentrados de zircões de diferentes amostras do Sienito pedra Branca.

Os padrões de ETR de zircão mostram normalmente anomalias de Ce (positivas) e Eu (negativas), cuja magnitude reflete as condições de oxidação dos magmas, já que esses dois elementos ocorrem em mais de uma valência. O Ce, quando tem valência 4+, substitui o Zr^{4+} na estrutura cristalina do zircão, dependendo das condições redox e da temperatura do magma (Trail et al, 2012).

Segundo Ferry & Watson (2007), zircão em rochas ígneas e metamórficas também pode ser utilizado como geotermômetro, baseando-se no conteúdo de titânio (Ti^{4+}) em sua composição. A incorporação de titânio na estrutura cristalina do zircão se dá a partir da substituição de Zr^{4+} por Ti^{4+} , e essa substituição é sensível à temperatura do sistema,

possibilitando, portanto, a realização de estimativas das temperaturas de cristalização de grãos individuais de zircão.

Apatita é um mineral presente em ampla variedade de rochas ígneas, e tem sido utilizado em diversos estudos que buscam determinar as condições de oxidação de magmas durante cristalização, devido ao fato de preservar características químicas do momento de sua cristalização, ser resistente a alterações composicionais pós-cristalização, além de possuir uma estrutura cristalina capaz de incorporar elementos sensíveis a variações das condições de oxidação do sistema, como Mn, Fe e ETR's (Miles et al, 2014).

Estudos recentes mostram que a titanita pode ser utilizada como um termobarômetro em rochas ígneas e metamórficas de diferentes composições. Segundo Hayden et al (2007), zircônio (Zr) é capaz de ser incorporado na estrutura cristalina da titanita, substituindo o titânio (Ti), e essa substituição é sensível a temperatura e pressão do sistema, possibilitando a realização de estimativas das temperaturas e pressões de cristalização de um magma com base no conteúdo de zircônio em titanita.

2.1. Geologia Regional

2.1.1. Província Mantiqueira

A Província Mantiqueira representa um sistema orogênico Neoproterozóico situado a leste dos crátons São Francisco e Rio de La Plata. A província guarda o registro da evolução geotectônica do território Sul Americano durante o período Neoproterozóico, assim como registra terrenos arqueanos, paleo e mesoproterozóicos em seu interior. (Bizzi , 2003).

O sistema orogênico da Província Mantiqueira inclui os orógenos Araçuaí, Ribeira, Dom Feliciano e São Gabriel, além da zona de interferência entre os orógenos Brasília e Ribeira (Fig 1) (Carvalho, 2011), e se estende por mais de 3000 km (Bizzi, 2003).

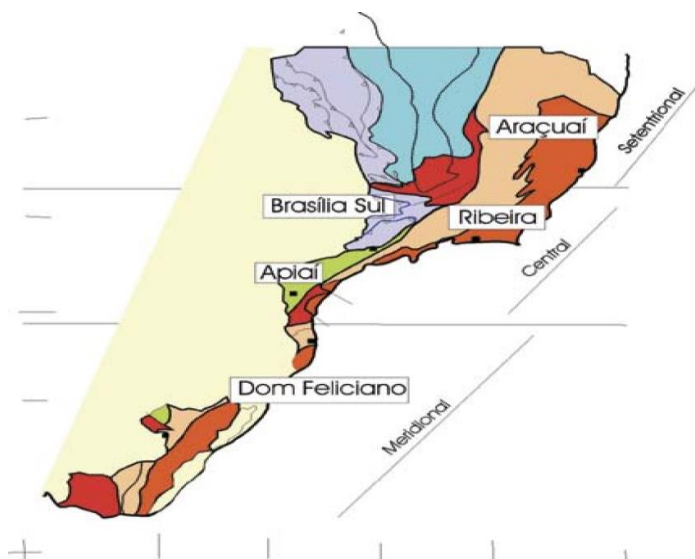


Fig 1: Província Mantiqueira e orógenos que a compõe (Heilbron et al, 2004. Retirado de Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, Chapter XIII: Província Mantiqueira, pág. 207, 2004).

Os orógenos correspondem ao tipo colisional, desenvolvidos durante a Orogenia neoproterozóica Brasiliana-Pan Africana, e tem como principal característica a intensa granitogênese associada (Bizzi, 2003).

De maneira simplificada, uma subdivisão estratigráfica da Província Mantiqueira, que pode ser aplicada em toda sua extensão, é ser representada por (Carvalho, 2011):

- Embasamento Arqueano e/ou Paleoproterozóico
- Sequências metassedimentares paleo a mesoproterozóicas
- Sequências metassedimentares e metavulcanossedimentares neoproterozóicas
- Granitóides neoproterozóicos
- Cobertura sedimentar neoproterozóica a cambriana.

2.1.2. Faixa Brasília

A Faixa Brasília corresponde a um cinturão de dobramentos de idade neoproterozóica, que ocorre na porção ocidental do cráton São Francisco, e estende-se por mais de 1200km. A Faixa Brasília pode ser subdividida em dois domínios estruturais, com base em diferenças estruturais e geocronológicas, sendo eles: Domínio Meridional e Setentrional (Uhlein et al, 2012).

De maneira simplificada, o Domínio Meridional registra o resultado da interação entre os Crátons São Francisco e Paranapanema, enquanto o Domínio Setentrional registra o resultado da interação entre os Crátons São Francisco e Amazônico (Uhlein et al, 2012).

No Domínio Meridional da Faixa Brasília ocorrem nappes com vergência rumo ao Cráton São Francisco. As nappes da Faixa Brasília são subdivididas em nappes inferiores e nappes superiores, todas apresentando metamorfismo de alto grau, porém as nappes superiores, regpresentadas pela Nappe Socorro-Guaxupé, apresentam associação com granitoides de composição cálcio-alkalina. (Heilbron et al, 2004).

2.1.3. Nappe Socorro-Guaxupé

A Nappe Socorro-Guaxupé faz parte de um sistema de nappes da Faixa Brasília (Domínio Meridional), e acredita-se representar um domínio de arco magmático desenvolvido em margem continental ativa, formado durante a fase colisional do orógeno Brasília, e é dominada por rochas plutônicas Neoproterozóicas (Campos Neto et al., 2004).

Diferentemente das nappes próximas, a Socorro-Guaxupé é caracterizada por apresentar rochas de afinidade alcalina, como o Sienito Pedra Branca (Fig 2.)

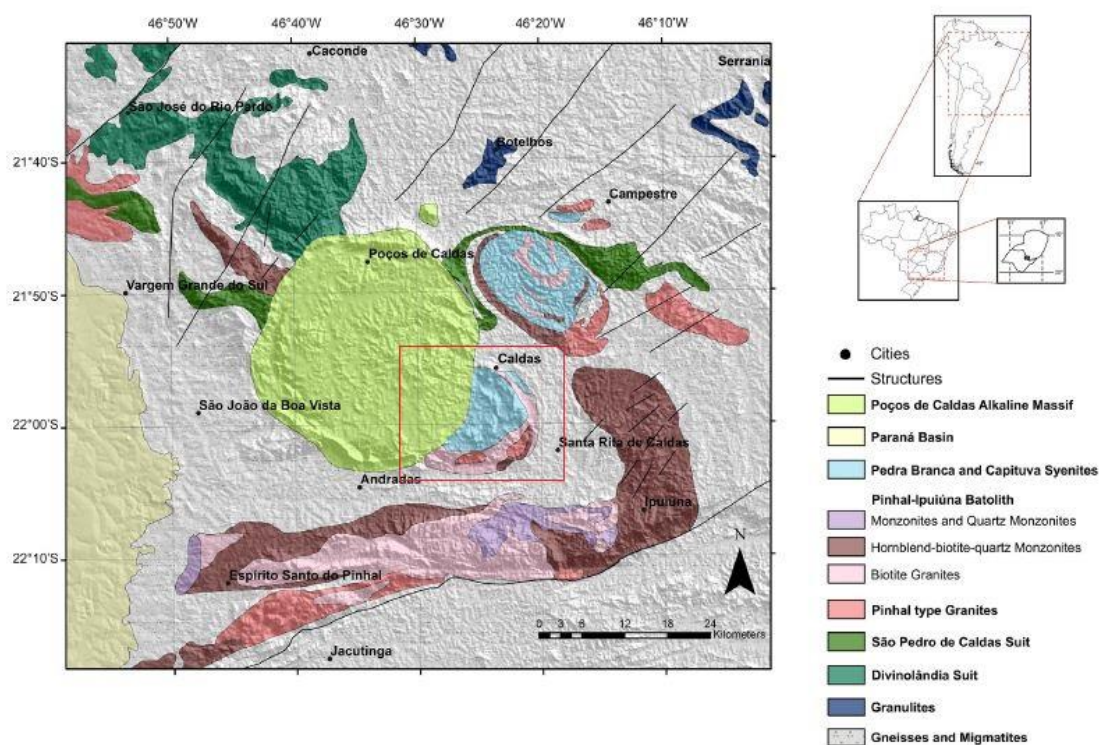


Fig 2. Mapa Geológico da porção Sul do Domínio Guaxupé, com o plúton Pedra Branca destacado. (Retirado de Janasi, 1999).

3. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como principal objetivo a utilização de minerais acessórios do Sienito Pedra Branca (apatita, titanita e zircão) para determinar as condições de cristalização (temperatura e fugacidade de oxigênio) entre cada unidade que compõe o plúton, identificando e quantificando, quando possível, as diferenças encontradas entre as unidades estudadas. Espera-se, deste modo, contribuir para a compreensão dos fatores responsáveis pela diversidade dos magmas que deram origem às várias unidades litológicas do plúton Pedra Branca.

4. TRABALHOS PRÉVIOS

O plúton Pedra Branca tem idade neoproterozóica, de aproximadamente 595 Ma, conforme determinado neste trabalho, e está localizado na região sul de Minas Gerais. O plúton cobre uma área, de aproximadamente 90 km², e é truncado pelo Maciço de Poços de Caldas, composto quase que exclusivamente por nefelina-sienitos, de idade Cretácea (Carvalho, 2011).

O mapeamento de semi-detalhe mostra que o plúton apresenta quatro unidades distintas de sienitos (Fig 3), três delas apresentando composições semelhantes entre si (sienitos supersaturados) com ligeiras diferenças texturais, e uma unidade de sienito saturado a insaturado, presente majoritariamente nas bordas do plúton (Carvalho & Janasi, 2012).

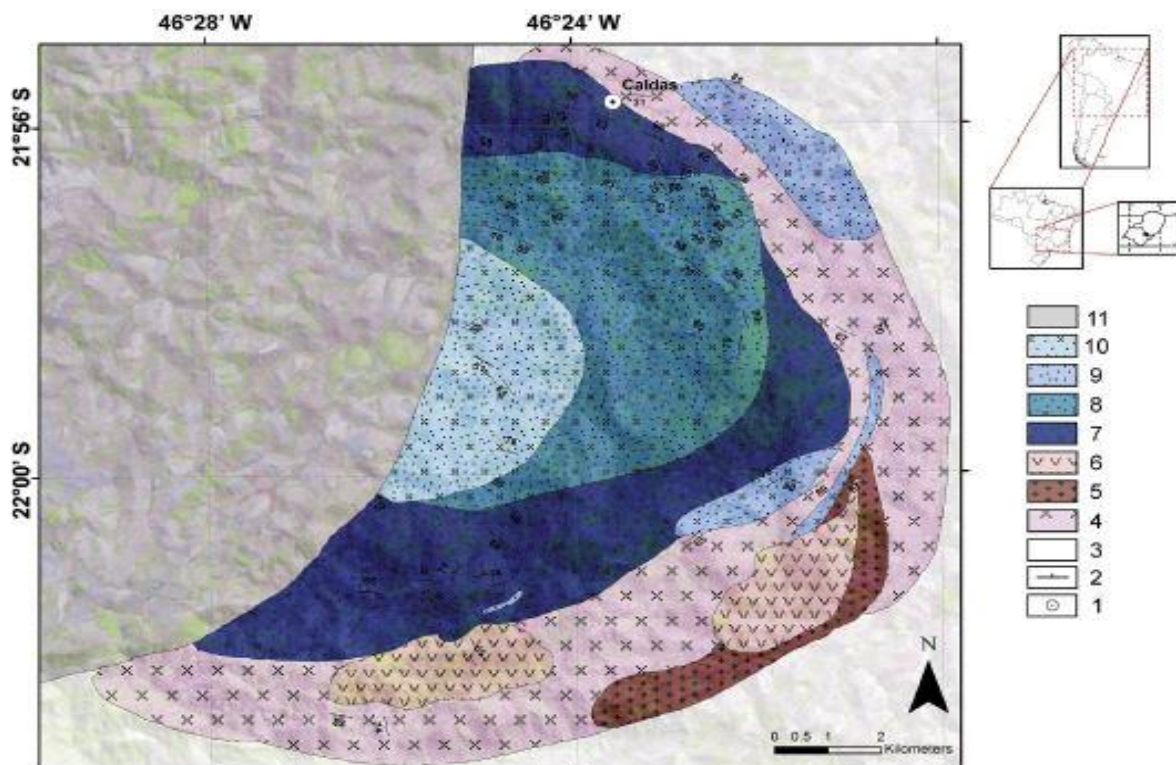


Fig. 3 Mapa Geológico do plúton Pedra Branca, destacando as diferentes unidades sieníticas que o compõe, e o Maciço Alcalino de Poços de Caldas. Legenda: 7- Sienito Laminado Saturado a Insaturado (SLSI), 8- Sienito Laminado Saturado (SLS), 9- Sienito Saturado Externo (SSE), 10- Sienito Supersaturado Interno (SSI), 11- Maciço Poços de Caldas. (Imagem retirada de Carvalho et al, 2014).

De maneira geral o plúton foi formado por uma sequência de três diferentes pulsos magmáticos:

- O primeiro pulso magmático, de composição insaturada a saturada em sílica, deu origem aos sienitos das bordas do plúton (Sienito Laminado Saturado a Insaturado, SLSI), que estão em contato com gnaisses do embasamento.
- O segundo pulso, já de composição saturada em sílica, deu origem aos sienitos saturados, com quartzo em sua composição (Sienito Laminado Saturado, SLS), que compõem a maior parte do plúton.
- O terceiro pulso, também de composição supersaturada, deu origem aos sienitos que compõem o núcleo do plúton (Sienito Supersaturado Interno, SSI).
- Também ocorre uma quarta unidade de corpos sieníticos lenticulares, também de composição supersaturada (Sienito Supersaturado Externo, SSE), que ocorre, separada das demais unidades sieníticas, por um extenso corpo granítico. (Carvalho, 2011).

Rochas de composição máfica a ultramáfica são geralmente encontradas associadas a diferentes unidades do plúton Pedra Branca, principalmente na forma de lentes e enclaves, geralmente concordantes com a foliação magmática principal. (Carvalho & Janasi, 2012).

Carvalho, tanto em sua tese de mestrado (Carvalho, 2011) quanto em seu artigo publicado (Carvalho e Janasi, 2012), apresenta uma detalhada descrição da petrologia das diferentes unidades do plúton Pedra Branca, divisão proposta por Janasi, em seu trabalho de mapeamento de semi-detalle, em 1996.

A unidade insaturada (SLSI) é caracterizada pela presença de clinopiroxênio de composição sódico-cálcica, pela ausência de quartzo e plagioclásio, e abundância de feldspato alcalino além de raras ocorrências de nefelina, mineral não encontrado nas demais unidades. Segundo Carvalho & Janasi (2012) esta unidade apresenta flogopita como principal fase hidratada e hematita com lamelas de ilmenita como principais óxidos de Fe-Ti.

As unidades supersaturadas (SLS, SSI e SSE) apresentam características semelhantes entre si, tanto em termos texturais quanto em termos composicionais. A principal diferença entre as unidades supersaturadas e a unidade insaturada, é a presença de quartzo intersticial, núcleos

reliquiaries de plagioclásio, menor proporção de feldspato alcalino, presença de clinopiroxênio cálcico, presença de ortopiroxênio (característica exclusiva da unidade supersaturada interna; SSI) e maior abundância de anfibólio, flogopita e óxidos de ferro, quando comparados à unidade SLSI (Carvalho & Janasi, 2012). Os óxidos de ferro das unidades supersaturadas são predominantemente ilmenita, com lamelas de exolução de hematita. A caracterização geoquímica geral do plúton Pedra Branca também já foi realizada, em sua tese de mestrado, Carvalho (2011) evidencia os altos teores de potássio em todas as unidades do plúton Pedra Branca, onde a unidade de sienitos insaturados (SLSI) apresenta os teores mais elevados. Além do potássio, outra característica importante do plúton é o enriquecimento em elementos traços incompatíveis, incluindo os elementos terras raras leves (Carvalho, 2011).

Estudos buscando caracterizar as condições de cristalização do Plúton Pedra Branca já foram realizados, em grande parte utilizando minerais principais, como feldspato alcalino, piroxênios e anfibólios, para a realização das estimativas. Alguns minerais acessórios já foram utilizados com o mesmo objetivo, Carvalho & Janasi (2012) utilizaram temperaturas de saturação de apatitas como aproximações para temperaturas liquidus de cristalização do magma, visto que a apatita é um mineral de cristalização precoce nas unidades do plúton Pedra Branca, portanto sendo um mineral representativo das primeiras fases de cristalização. Os resultados obtidos indicam cristalização sob temperaturas muito elevadas, 1091 ° C para a unidade insaturada a saturada, e 1065 ° C para as unidades supersaturadas.

Além disso, as condições redox do plúton foram estimadas a partir de estudos dos óxidos de ferro e titânio presentes nas diferentes unidades estudadas. De maneira geral, Carvalho & Janasi (2012) concluíram que todas as unidades do plúton Pedra Branca se cristalizaram sob condições oxidantes, indicado a partir do alto conteúdo de Fe^{3+} nos óxidos de ferro e titânio, por sua vez indicando proporções elevadas entre $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ no magma inicial. Segundo Carvalho & Janasi (2012) as unidades supersaturadas (SLS, SSI e SSE) são caracteristicamente menos oxidadas do que a unidade saturada (SLSI), e isto reflete em diferenças nas composições dos minerais, por exemplo, a unidade saturada (SLSI) é caracterizada pela presença de piroxênio sódico (egirina-augita $(\text{Na,Ca})(\text{Fe}^{3+},\text{Fe}^{2+},\text{Mg,Al})\text{Si}_2\text{O}_6$) e hematita (Fe_2O_3), como principal óxido de ferro, ambos apresentam Fe^{3+} em suas composições, evidenciando a abundância de Fe^{3+} na unidade SLSI. Já as unidades supersaturadas (SSI, SLS e SSE) são caracterizadas pela presença de díopsídio ($\text{Ca,Mg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$) e ilmenita (FeTiO_3) com lamelas de hematita, evidenciando condições menos oxidantes quando comparadas à unidade insaturada a saturada (SLSI) Carvalho & Janasi (2012).

Com base nos resultados das análises de rocha total, apresentados por Carvalho & Janasi (2012), e na figura 4, é possível perceber que as composições químicas entre as diferentes unidades do plúton Pedra Branca são muito semelhantes entre si, portanto, as heterogeneidades observadas entre unidades, em todos os minerais acessórios estudados anteriormente, devem ser fruto de condições de cristalização diferenciadas entre uma unidade e outra, e não apenas de composições distintas de magma.

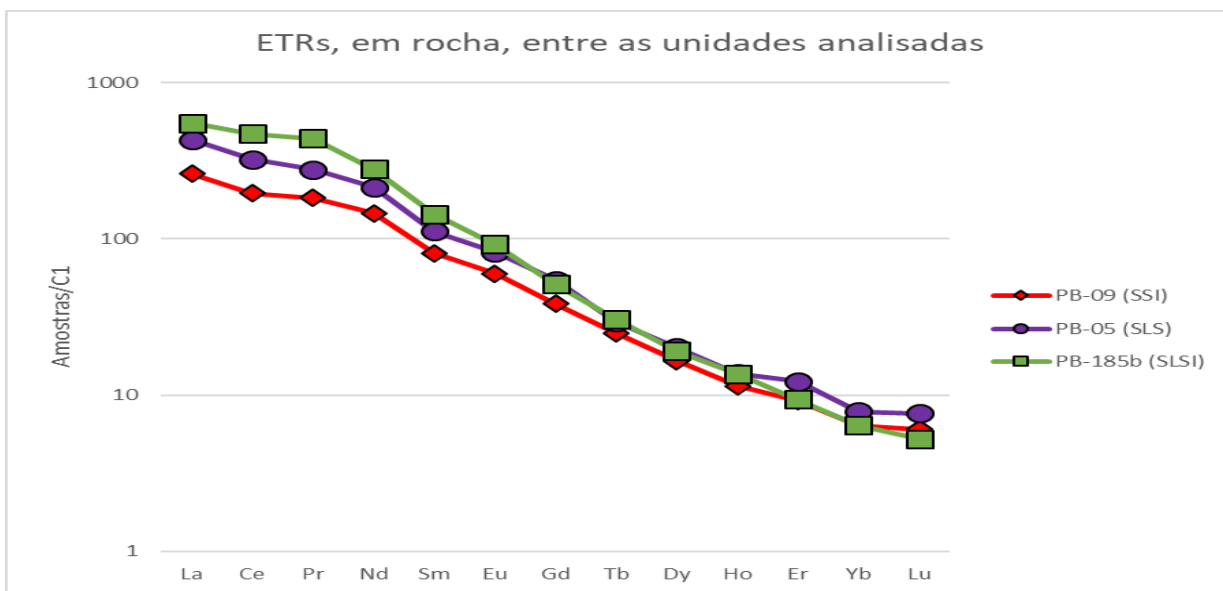


Figura 4: ETRs normalizado por condrito C1 (Taylor & McLennan (1985)), em rocha, entre as diferentes unidades de interesse. Dados extraídos de Carvalho & Janasi (2012).

5. MÉTODOS

5.1. Preparo de concentrado de zircão

Com o objetivo de realizar diferentes análises em cristais de zircão individuais, foi preparado um concentrado de zircão utilizando a amostra de sienito PB-123b e o método de preparação utilizado será descrito a seguir:

- Primeiramente se colocou fragmentos da amostra PB-123b diretamente em um britador de mandíbulas, com o intuito de reduzir a granulometria inicial.
- O material britado, recuperado em sacos plásticos, é introduzido em um moinho de discos, para uma segunda redução granulométrica.
- Todo o material moído é peneirado, utilizando peneiras de 60, 100 e 250 mesh. Todo o conjunto é colocado sobre um dispositivo elétrico que promove a separação granulométrica de maneira mais rápida.

- As frações maiores que 60-100 mesh voltam ao moinho para sofrer uma nova redução de granulometria, enquanto que a fração menor que 250 mesh é arquivada.
- A fração entre 100 e 250 mesh é então levada para uma mesa de Wiffley, ou mesa de concentração, para separação dos materiais pesados.
- Após todo o material passar pela mesa de concentração, é passado um imã de mão, sobre o material pesado espalhado em papel sulfite, para a retirada dos minerais com fortes propriedades magnéticas.
- O material excedente após purificação com imã de mão é processado em um Separador Magnético (Frantz), utilizado para separação de minerais com propriedades magnéticas mais fracas. O separador magnético é regulado para uma corrente de 0,3 A, isso garante a separação dos minerais paramagnéticos, como granadas, biotitas, piroxênios e anfibólios, da fração de interesse, que contém zircão.
- O material não magnético a 0,3 A é levado para purificação em líquidos densos, como o Bromofórmio e o Iodeto de Metila.

Após a separação do material utilizando os líquidos densos, o material pesado, ou seja, mais denso que o líquido, é levado novamente para o Separador Magnético, desta vez sob corrente de 1,0 A, e a fração não magnética deste processo é o material de interesse que contém zircão.

5.2. Teste químico de pureza dos concentrados

O Sienito Pedra Branca apresenta grande quantidade de apatita em sua composição, e a apatita é um mineral denso, não magnético, que não é facilmente separado do zircão utilizando os métodos de separação descritos no item anterior, portanto foi realizada uma sequência de testes químicos qualitativos, em parte do material do concentrado, com o intuito de se verificar a pureza/homogeneidade do concentrado. Os testes realizados serão descritos a seguir:

- Primeiramente se separou uma pequena parte do material do concentrado, seguido de moagem manual, para uma simples redução granulométrica.
- Em seguida foi adicionado ácido nítrico e se esquentou a solução em uma capela;
- Após um período de aproximadamente 30 minutos foi adicionado uma pequena quantidade de molibdato de amônio, agitou-se a solução e analisou-se a presença de precipitado amarelo, que indicaria a presença de fóstato na solução;

Após um pequeno período de tempo (aprox. 5min) verificou-se que não havia se formado precipitado, portanto o material do concentrado era homogêneo, composto majoritariamente por

zircão

5.3. Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS)

O método de LA-ICP-MS é uma análise *in situ*, de elementos traços e composição isotópica, utilizando técnicas que não envolvem dissolução química do material analisado. O método foi introduzido pela primeira vez por (Gray A, 1985), em seu trabalho *Solid sample introduction by laser ablation for inductively coupled plasma source-mass spectrometry* (Liu, 2013).

Segundo Liu (2013), LA-ICP-MS é baseado na aplicação de um feixe de laser, de alta potência, na superfície do material a ser analisado, transformando uma parte do material sólido em vapor. Este vapor é carregado por gases inertes (geralmente Ar ou He) até o espectrômetro de massa (ICP), que ioniza as partículas, filtra os diferentes íons com base na razão entre carga e massa e determina os componentes (Liu et al, 2013).

Algumas das vantagens da utilização do método escolhido são: Maior resolução espacial das análises, menor consumo de amostras, pouca interferência dos óxidos e hidróxidos nos resultados. Além do uso de LA-ICP-MS descartar a necessidade de realizar a dissolução química das amostras (Liu et al, 2013).

As análises de LA-ICP-MS foram realizadas no laboratório de Laser Ablation do Instituto de Geociências durante os meses de agosto a outubro, e o procedimento utilizado será descrito de maneira simplificada a seguir;

- Primeiramente foram marcadas as localizações de diversos cristais de apatita e titanita (em média 10 cristais por lâmina) em cada lâmina
- As lâminas marcadas então foram lavadas e secadas, e então posicionadas dentro do aparelho utilizado para a realização das análises, no caso, um amostrador por ablação a laser (modelo New Wave Up-213) hifenizado com Espectrômetro de massa com plasma de Argônio (modelo iCapQ-Thermo).
- Com a lâmina preparada e o equipamento ligado, foram ajustados os parâmetros para a realização das análises, sendo eles: Análise tipo Raster de 55µm, a uma velocidade de 2,0µm/s, com 80% de potência do laser, e frequência de 15 Hz. Cada análise teve duração de 120 segundos, com 60s o plasma (laser) inativo e 60s com o plasma ativo.
- Com o término das análises, foi utilizado o software “Glitter” para a realização do tratamento inicial dos dados, removendo padrões de interferência de inclusões típicas encontradas.

5.4 Datação U-Pb

A datação U-Pb com zircão foi realizada no equipamento SHRIMP IIe instalado na CPGeo, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. O SHRIMP é um espectrômetro de massa acoplado a uma microsonda iônica de alta resolução que utiliza feixes de íons primários para atingir um alvo, de onde os íons secundários são gerados e analisados. Os íons secundários são carregados através do equipamento e os isótopos gerados pela amostra; $^{254}\text{UO}^+$, $^{206}\text{Pb}^+$, $^{207}\text{Pb}^+$, $^{208}\text{Pb}^+$, $^{238}\text{U}^+$ e $^{254}\text{ThO}^+$ e $^{196}\text{Zr}_2\text{O}^+$, são medidos sucessivamente.

As correções exigidas pela técnica aplicada são feitas por análises de materiais desconhecidos e materiais de referência, com relações isotópicas conhecidas, para determinar fatores de calibração específicos (Black et al, 2004). Entre 12 e 16 análises pontuais de cada uma das amostras desconhecidas de zircão são realizadas de acordo método descrito em Sato et. al. (2014). Durante o procedimento, a cada 5 análises do material desconhecido, uma análise do material de referência, Temora-2 (idade estimada de $416,78 \pm 0,33$ Ma; Black et al, 2004) é usado como referência de idade $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$, para cálculo dos fatores de correlação e de fracionamento de chumbo comum. Correções de chumbo comum geralmente usam ^{204}Pb . O material de referência SL13 (238 ppm) é usado como referência de composição urânio. Os dados são reduzidos com o software SQUID 1.6 (Ludwig, 2009) e o software ISOPLOT 4 (Ludwig, 2003) tem sido usado para o tratamento dos dados, para estimar as idades e gerar diagramas.

6 RESULTADOS OBTIDOS

7.1 Petrografia Macroscópica

As amostras utilizadas no estudo foram selecionadas buscando representar as diferentes unidades que compõe o plúton Pedra Branca, portanto escolheram-se amostras da unidade insaturada em sílica, de afinidade peralcalina (SLSI – Sienito Laminado Saturado a Insaturado; amostra: PB-181 A e PB-185 A), amostras das unidades supersaturadas, de afinidade metaluminosa (SSI – Sienito Supersaturado em Sílica Interno; amostras PB-09, PB-59-01, PB-59-02), amostras da segunda unidade supersaturada de composição intermediária (SLS – Sienito Laminado Supersaturado; amostra PB-123b), assim como duas amostras de enclaves máficos (PB-115), ocorrência comum em grande parte das unidades do plúton.

7.1.1 Sienitos

O sienito insaturado a saturado (SLSI) apresenta coloração escura (marrom-escuro à cinza-escuro), com presença de leve foliação magmática, definida pela orientação preferencial dos cristais de feldspato alcalino, textura inequigranular média a grossa, em geral apresentando índices de cor elevados, entre 25 e 35%. Sua composição é definida pela presença de feldspato alcalino, piroxênio, anfibólio, micas escuras, apatita e titanita

Os sienitos metaluminosos possuem coloração mais clara (geralmente cinza-claro), com índices de cor inferiores aos do SLSI, com valores entre 10 e 30%. Apresentam textura inequigranular fina a média, compostos principalmente por feldspato alcalino, anfibólios, piroxênios, micas escuras e apatita.

7.1.2 Enclaves máficos

Além das amostras de sienito, também foram descritos uma amostra de enclave máfico associado à unidade SLSI (PB-115) e uma amostra de um corpo externo, de rocha melanocrática, situado a norte do sienito Pedra Branca.

A amostra PB-170 apresenta cor cinza-escura, índice de cor de 70%, textura inequigranular fina, composto principalmente por piroxênio, anfibólio, biotita, óxidos de ferro e feldspato alcalino. Já a amostra PB-115 apresenta textura fanerítica fina a média, com índice de cor elevado (aprox. 65-70%), composta principalmente por piroxênio, biotita, titanita e feldspato alcalino, encontrada dentro da unidade insaturada (SLSI) do plúton Pedra Branca.

7.2 Petrografia Microscópica

7.2.1 Unidade Supersaturada Interna (SSI)

7.2.1.1 *PB-09*

A amostra PB-09 apresenta granulação média, com cristais de até 4 mm, sua mineralogia é composta principalmente por feldspato alcalino (55%), diopsídio (15%), anfibólios (10%), flogopita (7%), ortopiroxênio (5%), apatita (6%) e titanita (1%)

A fase mineral principal é o feldspato alcalino, compondo cerca de 55% em volume da rocha, de hábito subédrico a euédrico, com grande quantidade de pequenas inclusões (0,1 a 0,3mm) de diopsídio, opacos apatita e anfibólios associado. Também foram observados raros zoneamentos composicionais, em alguns cristais, assim como microtexturas de intercrescimento, no caso, mirmequitas (Anexo I – Foto 01).

A principal fase máfica é o piroxênio (diopsídio), com hábitos subédricos a anédricos, alguns apresentando núcleos intensamente alterados para flogopita. As inclusões associadas, em geral, são de cristais de apatita e minerais opacos. Foi comumente observado núcleos relíquias de diopsídio em meio a cristais de anfibólio, descritos como Hornblenda, sugerindo origem por substituição dos piroxênios.

Ortopiroxênio também foi observado na amostra, descrito como enstatita, em geral presente em formato granular, anédrico, geralmente apresentando inclusões, principalmente, de opacos e apatita.

A flogopita e a hornblenda são as principais fases hidratadas descritas, sendo a flogopita tipicamente tardia, intersticial entre os demais cristais, sempre associada a uma rica presença de minerais opacos (Anexo I – Foto 02), enquanto que a hornblenda está sempre associada aos diopsídios, na forma de coronas.

O principal mineral acessório presente é a apatita, que ocorre na forma de pequenos cristais subédricos a euédricos, inclusos em todas as outras fases minerais, indicando cristalização precoce. Além da apatita, também se observou raros cristais de titanita, em geral cristalizados em torno dos minerais opacos da rocha.

Na bibliografia estudada quartzo é descrito em amostras da unidade supersaturada interna (SSI), na forma de pequenos cristais intersticiais, tardios, porém no presente trabalho não foi identificado quartzo nas amostras estudadas.

A tabela abaixo procura oferecer uma estimativa da ordem de cristalização da amostra PB-09, com base no estudo petrográfico realizado.

Mineral	Precoce	Principal	Tardio
Apatita	-----	-----	-----
Feldspato Alcalino	----	-----	-----
Diopsídio		-----	-----
Opx (Enstatita)		-----	-----
Anfbólio (Hornblenda)			-----
Flogopita			-----
Quartzo			----

Tabela 1: Ordem de cristalização estimada (PB-09)

7.2.1.2 PB-59-01 e PB-59-02

A amostra PB-59 apresenta textura granulação fina a média, com cristais de até 2,5mm, compostos principalmente por feldspato alcalino, diopsídio, anfibólio, ortopiroxênio, flogopita, apatita e titanita.

Assim como na amostra PB-09, o feldspato alcalino compõe a principal fase mineral (cerca de 60% em volume), apresentando hábitos tabulares, subédricos a euédricos. É comum a presença de pertitas, por vezes mesopertitas. Em geral os feldspatos são ricos em inclusões de piroxênio, minerais opacos, apatita e ortopiroxênio (Anexo I – Foto 03). Apresentando, mais raramente, texturas de intercrescimento associadas, como mirmequitas.

A principal fase máfica é composta por clinopiroxênio, de coloração verde-clara a incolor, descritos como diopsídio. É comum a presença de inclusões de apatita e minerais opacos, assim como a associação de flogopitas aos núcleos alterados dos piroxênios.

A presença de ortopiroxênio também é comum, com proporções entre 5 e 10%, em geral apresentando hábito granular, subédrico a anédrico, de coloração avermelhada.

Os anfibólios descritos apresentam coloração verde, descritos como hornblenda, com inclusões de apatita, opacos, e mais raramente, de ortopiroxênio. Muitas vezes são encontrados núcleos reliquiais de piroxênio em meio a cristais de anfibólio, indicando um processo de substituição de piroxênio por anfibólio.

A flogopita ocorre em pequenas proporções, na forma de coronas ao redor dos minerais opacos e piroxênios (Anexo I - Foto 04).

A apatita é o principal mineral acessório encontrado, com proporções de até 2%, ocorrendo na forma de inclusões aciculares finas a cristais euédricos bem desenvolvidos (Anexo I – Foto 05).

A titanita ocorre em proporções inferiores a 0.5%, sempre anédricas, associadas a minerais opacos, provavelmente produto de reações/alterações tardias (Anexo I – Foto 06).

A tabela abaixo procura oferecer uma estimativa da ordem de cristalização das amostras PB-59-1 e PB-59-02, com base no estudo petrográfico realizado.

Mineral	Precoce	Principal	Tardio
Apatita	-----	-----	-----
Feldspato Alcalino	-----	-----	-----

Ortopiroxênio (Enstatita)		-----	-----
Diopsídio		-----	-----
Anfibólio		-----	-----
Flogopita			-----
Titanita			--
Quartzo			-

Tabela 2: Ordem de cristalização estimada (PB-59-01 e PB-59-02)

7.2.2 Unidade Laminada Supersaturada (SLS)

7.2.2.1 PB-123b

A amostra PB-123b apresenta granulação média, inequigranular (com cristais entre 0,2mm a 4 mm), levemente foliada, com a foliação magmática caracterizada pela orientação preferencial dos cristais de feldspato alcalino.

A fase mineral mais abundante é o feldspato alcalino, que compõe cerca de 55% em volume da rocha, caracterizado por apresentar hábito tabular (euédrico a subédrico), além de apresentar micro inclusões de minerais opacos, apatita e de piroxênio, germinação tipo *Carlsbad* e a ocorrência de pertitas (em geral finas, compondo de 20 a 30% do mineral) também são características comuns.

A fase máfica principal é piroxênio, descrito como diopsídio, com proporções entre 15 e 25%. De maneira geral, apresenta hábito subédrico a euédrico, por vezes com núcleos intensamente substituídos por flogopita (Anexo I – Foto 09), o que deve ser resultado da interação do piroxênio com o próprio líquido, durante o resfriamento. Inclusões de minerais opacos, zircões e apatitas são comuns nos piroxênios (Anexo I – Foto 09), assim como a associação dos piroxênios com outras fases máficas tardias, como anfibólios e flogopitas, possivelmente resultado de processos de hidratação e alteração dos piroxênios em fases máficas hidratadas.

A ocorrência de anfibólio é comum, porém não é abundante na amostra (<10%), em geral são cristais anédricos, sempre associados à piroxênios, descritos como hornblendas.

A flogopita ocorre como fase tardia, intersticial, por vezes bordeando minerais opacos, com proporções menores a 5%, e também se encontra associada aos piroxênios, na forma de alterações dos núcleos dos diopsídios.

O principal mineral acessório observado é a apatita, com proporções de até 5% em volume, tipicamente euédrica a subédrica, apresenta-se inclusa em quase todas as outras fases minerais, indicando cristalização precoce.

A presença de titanita também foi descrita (<2%), em geral são anédricas, tipicamente associadas aos minerais opacos, cristalizada em suas bordas.

A tabela abaixo procura oferecer uma estimativa da ordem de cristalização da amostra PB-123b, com base no estudo petrográfico realizado.

Mineral	Precoce	Principal	Tardio
Zircão		-----	-----
Apatita	-----	-----	-----
Diopsídio		-----	-----
Plagioclásio	---	-----	-----
Anfibólios			-----
Opacos			-----
Titanita			-----
Flogopita			-----

Tabela 3: Ordem de cristalização estimada (PB-123b)

7.2.3 Unidade Saturada a Insaturada (SLSI)

7.2.3.1 PB-181 A e PB-185 A

As amostras PB-181 A e 185 A apresentam características texturais e mineralógicas muito semelhantes, portanto serão descritas em conjunto.

As duas amostras apresentam textura fanerítica média, com macrocristais de feldspato alcalino, de até 5 mm, levemente orientados definindo uma fraca foliação magmática. Em geral as amostras são compostas principalmente por: feldspato alcalino, clinopiroxênio (egirina-augita), hornblenda, flogopita, apatita e titanita.

A principal fase mineral é o feldspato alcalino, com proporções entre 40 e 50% em volume, apresentando hábito tabular (euédrico a subédrico), fortemente alterado, com abundante presença de inclusões de minerais opacos, apatitas, piroxênios, além de finas inclusões aciculares de coloração marrom (Anexo I – Foto 11). Germinação *Carlsbad* é bastante comum, além da presença de micropertitas, em alguns cristais.

A principal fase máfica é composta por piroxênio sódico-cálcico, de coloração verde-escura, descrito como egirina-augita (15 a 20% em volume). Em geral são cristais subédricos,

com eventuais inclusões de minerais opacos e apatita, alguns apresentam bordas alteradas para um anfibólio de coloração azul descrito como riebeckita.

Dois anfibólios também foram descritos, em ambas as lâminas, um de coloração verde, anédrico, na forma de cristais independentes, descritos como hornblenda, concordante com descrições anteriores, feitas por Carvalho (2011). O segundo anfibólio, descrito como Riebeckita, nunca foi descrito na bibliografia estudada, apresentando pleocroísmo de verde à azul claro, sempre associado às egrina-augitas, na forma de bordas de anfibólio, com núcleos de piroxênio.

A flogopita observada é tipicamente intersticial, com cristais anédricos de até 1 mm, geralmente associados às fases máficas, como os piroxênios e opacos.

O principal mineral acessório é a apatita, caracterizada por cristais euédricos a subédricos, grandes (alguns cristais com até 4mm de tamanho), moderadamente alterados e com raras inclusões, indicando uma potencial cristalização precoce.

Outro importante mineral acessório identificado foi titanita, em ambas as amostras, foram descritas titanitas pertencentes a duas fases de cristalização distintas. Observaram-se cristais independentes de titanitas subédricos (com tamanhos de até 1 mm), com finas inclusões de opacos, interpretadas como sendo cristalizadas em etapas mais precoces de cristalização. Em contraste, também foram observados finos cristais anédricos de titanita, intersticiais, geralmente bordeando cristais de minerais opacos (Anexo I – Foto 12), interpretados como sendo cristalizados em fases mais tardias de cristalização, ou até mesmo sendo produtos de reação entre opacos e as demais fases minerais descritas.

A tabela abaixo procura oferecer uma estimativa da ordem de cristalização das amostras PB-181 A e 185 A, com base no estudo petrográfico realizado.

Mineral	Precoce	Principal	Tardio
Zircão		=====	=====
Apatita	=====	=====	=====
Egrina-augita		=====	=====
Feldspato Alcalino	=====	=====	=====
Anfibólios			=====
Minerais opacos			=====
Titanita		=====	=====
Biotita			=====

Tabela 4: Ordem de cristalização estimada (PB-181 A e 185 A)

7.2.4 Enclaves

7.2.4.1 Enclave PB-115c

A amostra 115c representa um enclave máfico encontrado na unidade insaturada (SLSI) do plúton. Em geral apresenta textura cumulática, com cristais de granulação média a grossa (com macrocristais de feldspato alcalino de até 5 mm). A fase cumulus é composta principalmente por cristais de clinopiroxênio e apatita, enquanto que a fase intercumulus é composta principalmente por flogopita, anfibólio, titanita e feldspato alcalino.

A fase mineral mais abundante é o piroxênio, com proporções de até 40% em volume de rocha, de coloração verde escuro, descrito como egrina-augita. Em geral apresentam hábito subédrico a euédrico, fortemente alterados e fraturados, com inclusões de apatita, titanita, opacos e zircão.

O principal mineral félsico encontrado foi feldspato alcalino, com proporções entre 15 e 25%, intensamente alterados, caracterizados por apresentar hábito subédrico a anédricos (diferente das demais amostras descritas em que os feldspatos são tipicamente euédricos). Em grande parte, os feldspatos da amostra PB-115c são intersticiais, entre cristais de piroxênio e apatita, indicando uma cristalização mais tardia em relação aos demais mineiras.

Uma importante característica da amostra PB-115c é a abundância de apatita em sua composição, chegando a proporções de até 5%, em geral são macrocristais euédricos (0,5 mm a 3,5 mm), inclusos nas demais fases minerais, apresentando apenas raras inclusões de zircão, indicando uma cristalização precoce em relação aos demais minerais que compõe a rocha.

A principal fase hidratada descrita foi flogopita, com proporções de até 10%, de cor marrom escuro a alaranjado, tipicamente intersticial, com inclusões principalmente de apatita, titanita e opacos (Anexo I – Foto 07).

Outro importante mineral acessório descrito foi a titanita (<5%), que diferentemente das amostras PB-09, PB-59 e PB-123b, são cristais independentes, subédricos a anédricos, raramente estão associados a minerais opacos, apresentam inclusões de apatita, egrina-augita e feldspato alcalino (Anexo I – Foto 08).

A tabela abaixo procura oferecer uma estimativa da ordem de cristalização da amostra PB-115c, com base no estudo petrográfico realizado.

Mineral	Precoce	Principal	Tardio
Zircão		-----	-----

Apatita	-----	-----	-----
Egirina-augita	-----	-----	-----
Feldspato Alcalino		-----	-----
Titanita		-----	-----
Flogopita			-----

Tabela 5: Ordem de cristalização estimada (PB-115c).

7.2.5 Corpo máfico externo (PB-170)

A amostra PB-170 representa um corpo de rocha máfica isolado, que se considera provavelmente associado a Pedra Branca. Em geral apresenta textura cumulática, de granulação inequigranular fina a média (cristais entre 0,1 e 0,5 mm), composta principalmente por anfibólio, plagioclásio, apatita, titanita e biotita.

A fase mineral mais abundante é o anfibólio (com proporções de até 55% em volume), de coloração verde escuro, moderadamente alterado, de hábito subédrico a euédrico, com grande número de inclusões, principalmente de apatita, porém ocasionalmente se encontra inclusões de zircão associadas, descrito como hornblenda (Anexo I – Foto 10).

A fase félsica principal é composta por plagioclásio, intersticiais, intensamente alterados, com inclusões principalmente de apatita e opacos. Observam-se raramente germinações tipo *Carlsbad* e polissintética preservada.

A apatita é o mineral acessório mais comum no enclave, com proporções de até 5% em volume, geralmente na forma de cristais subédricos a euédricos (0,05 a 0,3 mm), inclusos em todas as outras fases minerais, indicando uma cristalização precoce em relação aos demais minerais.

A titanita também é um importante mineral acessório encontrado, porém com proporções bem menores as da apatita (<2%), estão geralmente associadas a minerais opacos, na forma de coronas cristalizadas ao redor dos opacos.

A principal fase hidratada descrita foi a flogopita, com proporções entre 10 e 15 % em volume, de coloração marrom escura à alaranjado e são tipicamente intersticiais, sendo a principal fase mineral que compõe o intercumulus. Em geral apresentam inclusões de apatita, anfibólio e zircão.

Com base no estudo petrográfico realizado, a tabela abaixo procura oferecer uma estimativa da ordem de cristalização dos minerais da amostra PB-170.

Mineral	Precoce	Principal	Tardio
Zircão		-----	-----
Apatita	-----	-----	-----
Hornblenda		-----	-----
Plagioclásio		-----	-----
Flogopita			-----
Titanita			-----

Tabela 6: Ordem de cristalização estimada (PB-170)

7.3 Química de elementos traço em minerais acessórios.

7.3.1 Apatitas

Foram analisadas apatitas nas amostras PB-09, PB-115, PB-170, PB-181 A, PB-185 A e PB-123. Os resultados apresentados nas figuras 5 e 6 são apenas as médias calculadas a partir de uma série de análises, por volta de 10 a 15 análises por amostra, e que os resultados completos estão apresentados em anexo (Anexo II).

Texturalmente as apatitas encontradas na unidade supersaturada interna (SSI) foram descritas, na microscopia, como sendo pequenos cristais subédricos a euédricos, de cristalização precoce, enquanto que as apatitas das unidades insaturada e supersaturada (SLSI e SLS respectivamente) foram caracterizadas por serem grandes, bem desenvolvidas, também interpretadas como sendo cristalizadas em fase precoce.

Em geral as apatitas analisadas, das três unidades e do enclave, apresentam um grande enriquecimento em elementos como urânio e lantânio assim como um forte padrão de fracionamento (enriquecimento em elementos terras-raras leves em relação aos pesados), indicado nas figuras 5 e 6;

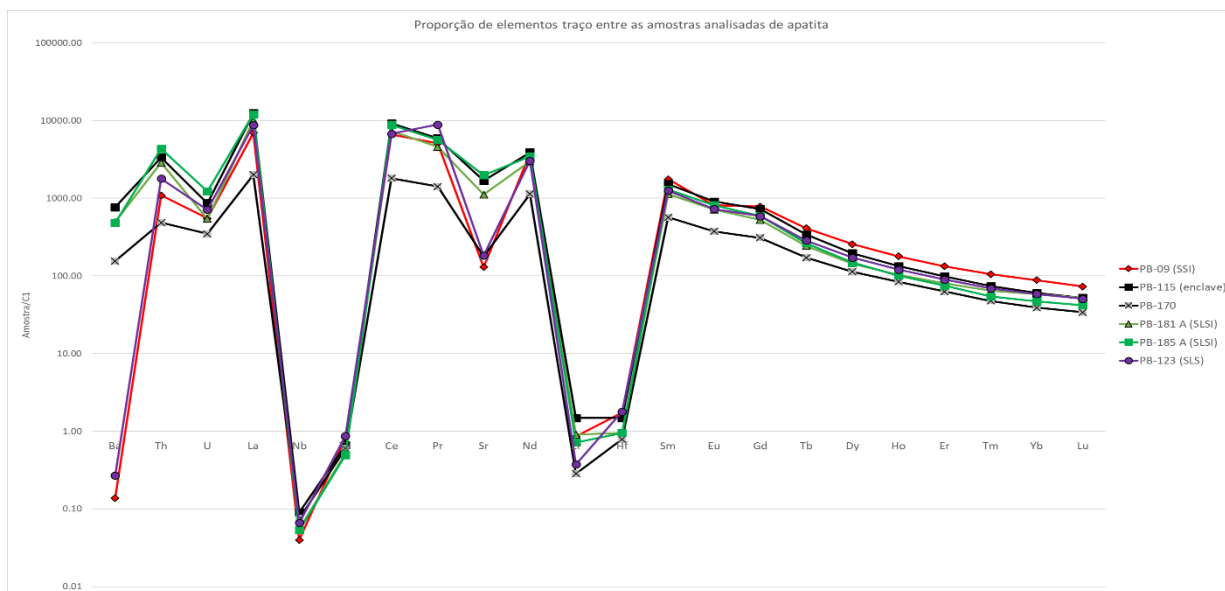


Fig 5: Comparação entre proporção média de elementos traço, em apatita, de cada unidade estudada

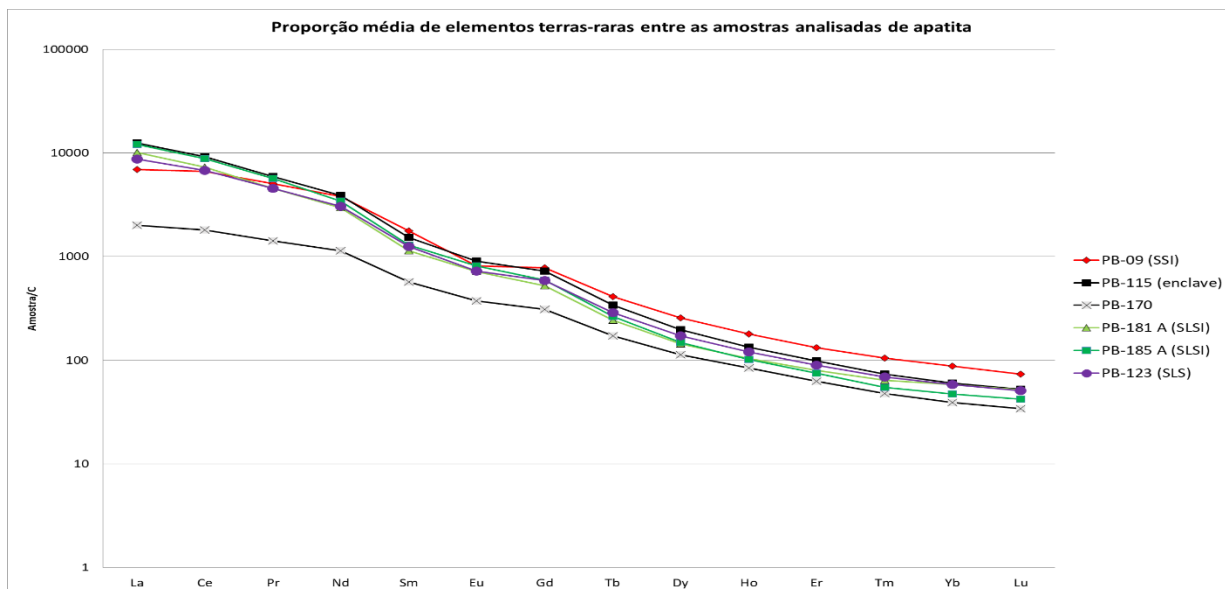


Figura 06: Comparação entre a proporção média de elementos terras-raras, em apatita, de cada unidade estudada

Observa-se que as apatitas do enclave PB-170 são mais empobrecidas em todos os elementos estudados, em relação às apatitas das demais unidades, além disso, destaca-se o empobrecimento em zircônio e estrôncio observado em todas as amostras. A apatita da unidade supersaturada interna (em vermelho nas figuras 05 e 06), quando comparada à unidade insaturada (em verde nas figuras 05 e 06), apresenta um menor enriquecimento em tório e urânio e uma anomalia negativa mais acentuada de estrôncio, porém são mais enriquecidos em elementos terras-raras, mais especificamente nos membros médios e pesados da família dos elementos terras-raras (figura 06).

7.3.1 Titanita

Foram analisadas cinco amostras de duas unidades diferentes do plúton, unidade SLSI (Sienito Laminado Saturado a Insaturado) e SLS (Sienito Laminado Supersaturado), do plúton Pedra Branca. As amostras analisadas foram: PB-08 A (SLSI), PB-181 (SLSI), PB-185 (SLSI), PB-123b (SLS) e PB-115 (enclave associado à unidade SLSI). Não foi possível analisar titanita nas amostras da unidade supersaturada interna (SSI) pois não foi identificado um número significativo de cristais de tamanho o suficiente para a realização das análises a laser. Os resultados completos estarão apresentados na forma de tabelas em anexo (Anexo II).

De maneira geral as titanitas da unidade SLSI, descritas na microscopia, são grandes cristais independentes, subédricos, possibilitando, em alguns casos, a realização de análises tipo centro-borda, devido ao tamanho dos cristais, enquanto que as titanitas da unidade SLS são caracterizadas por serem pequenas, em menor proporção e principalmente cristalizadas na forma de borda de minerais opacos.

Em todas as amostras analisadas foi observado um expressivo enriquecimento em elementos como: Urânio, Tório e elementos terras-raras leves, mais especificamente, La, Ce, Nd e Sm, além da forte anomalia negativa de Estrôncio, como pode ser observado na figura 7;

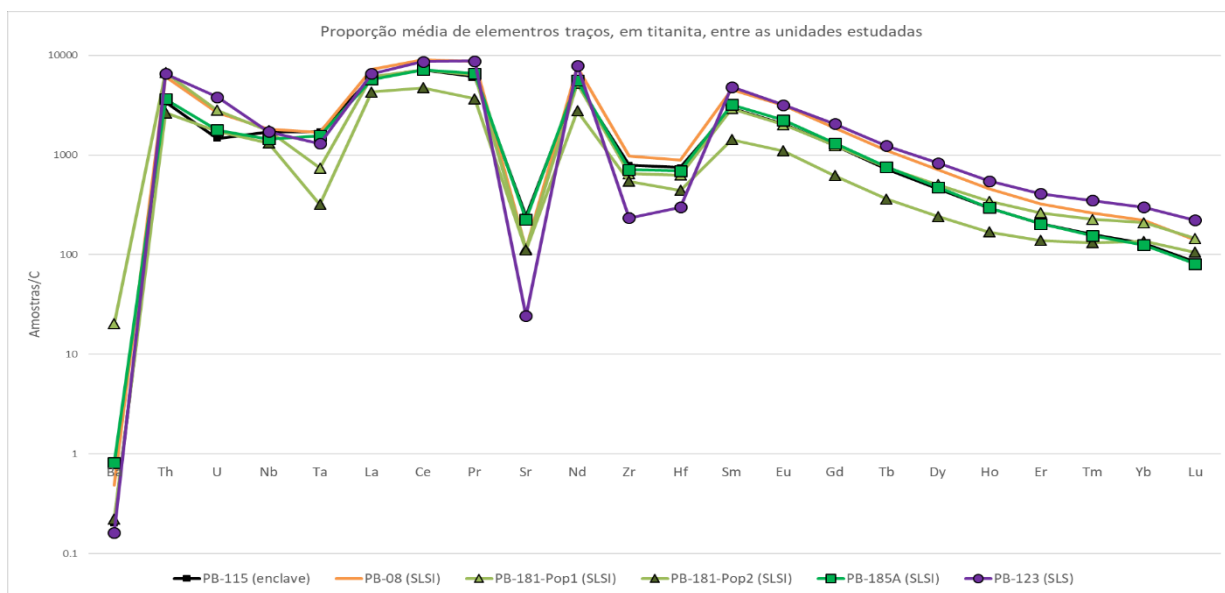


Figura 7: Elementos traços, em titanita, normalizado por condrito entre todas as amostras estudadas.

Nota-se que a amostra PB-123 (unidade SLS) apresenta teores mais elevados de elementos como tório, urânio e ETRs pesados, além de anomalias negativas de estrôncio e zircônio mais expressivas, em relação as amostras da unidade SLSI.

Os diagramas de elementos terras raras (figuras 8 a 12) mostram o padrão de fracionamento dos elementos terras raras, indicam o enriquecimento de elementos terras-raras leves em relação aos elementos terras-raras pesados, e não apresentam anomalias significativas.

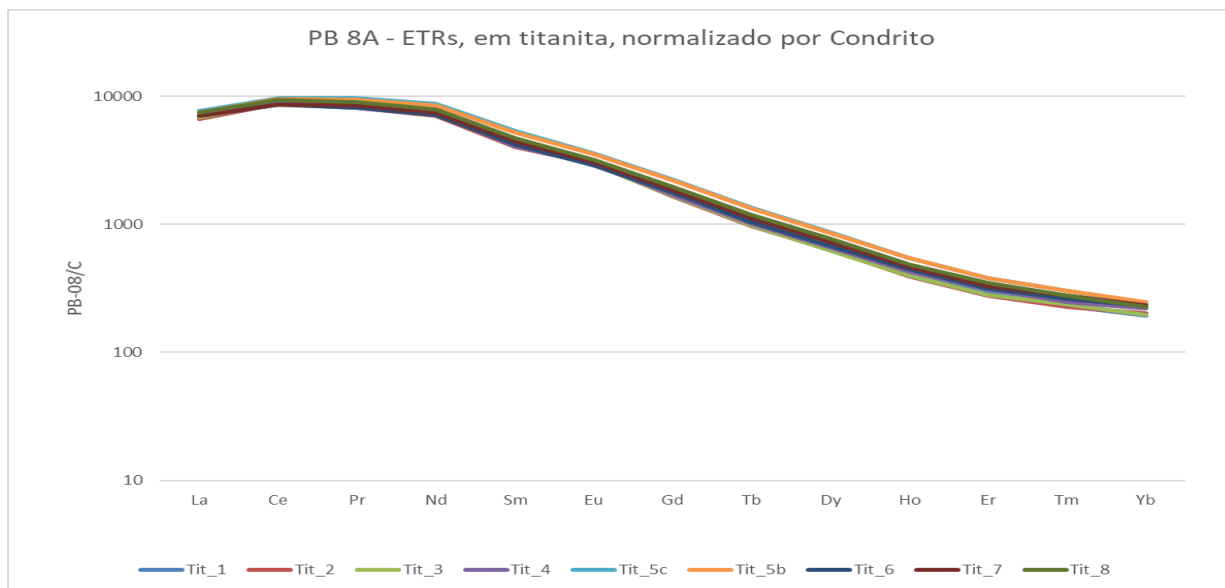


Figura 8: Padrão de elementos terras raras, em titanita, da amostra PB-08A (unidade SLSI)

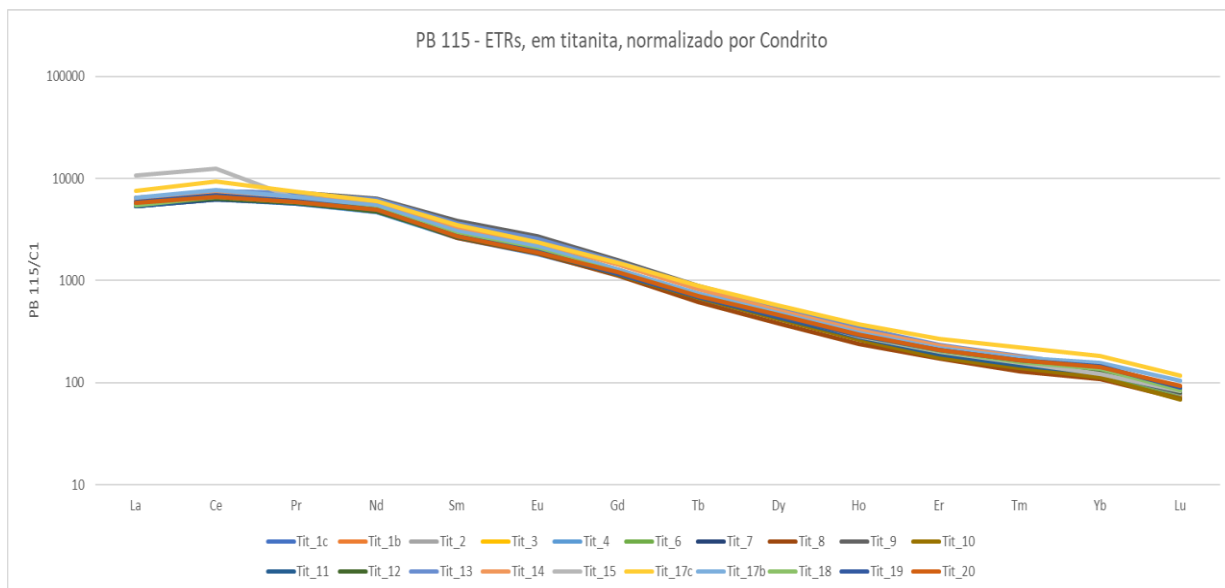


Figura 9: Padrão de elementos terras raras, em titanita, da amostra PB-115 (enclave máfico)

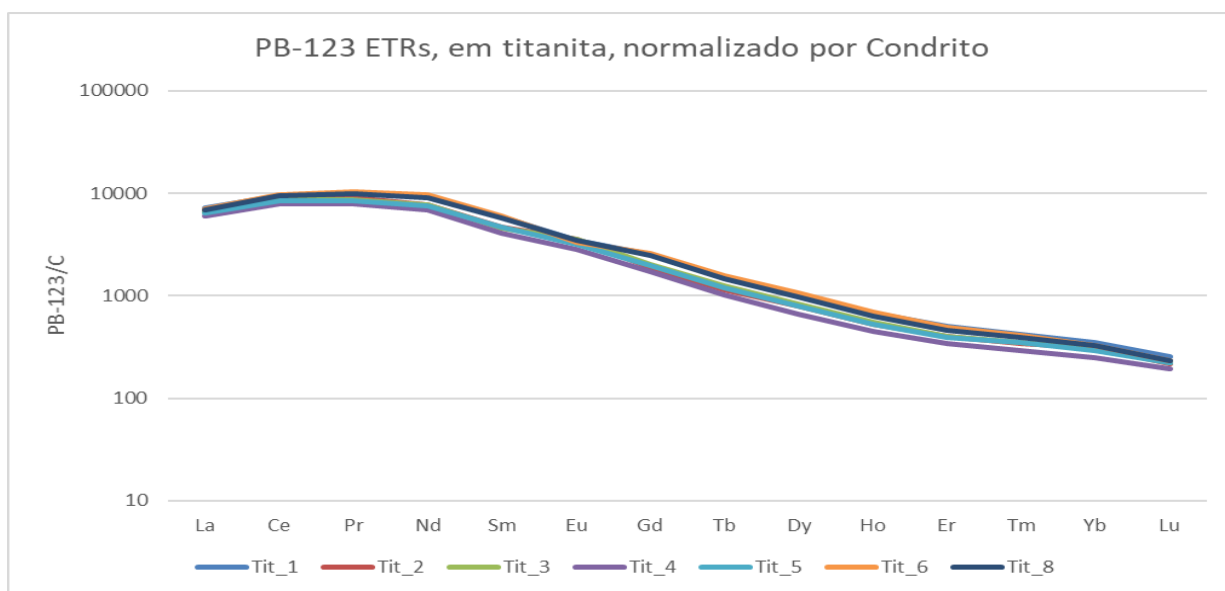


Figura 10: Padrão de elementos terras raras, em titanita, da amostra PB-123 (SLS)

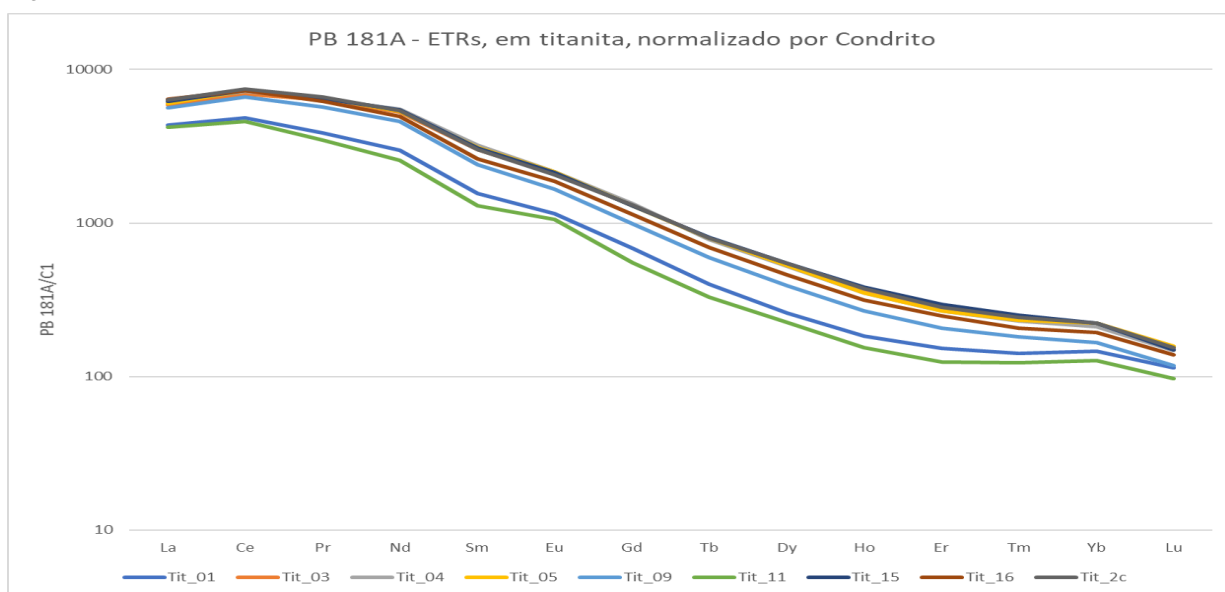


Figura 11: Padrão de elementos terras raras, em titanita, da amostra PB-181 (unidade SLSI)

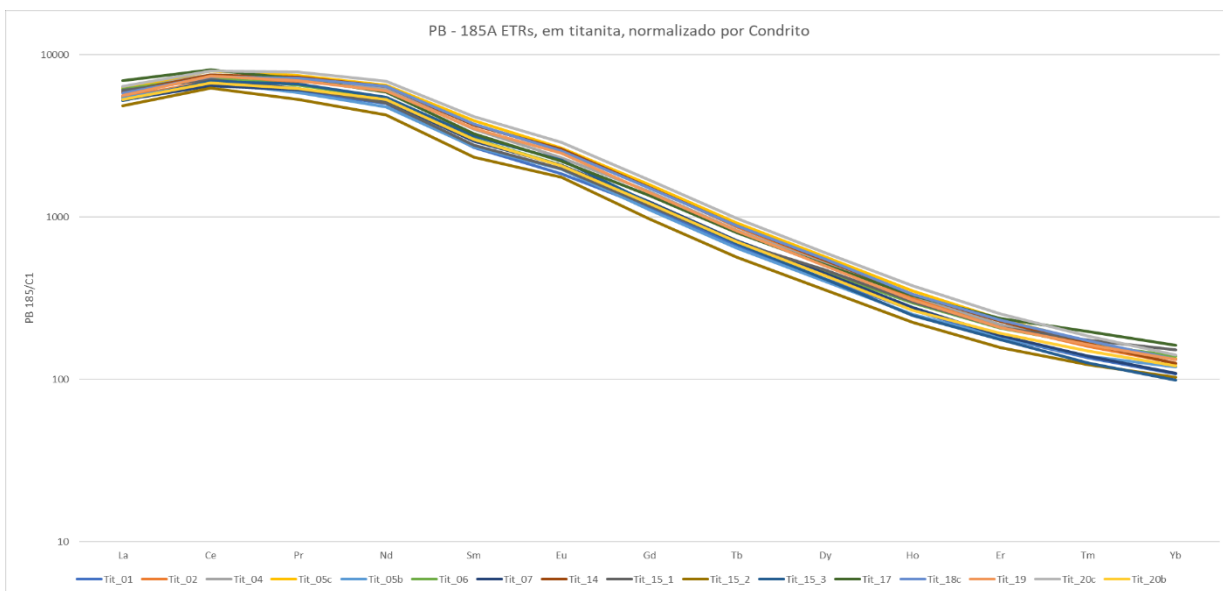


Figura 12: Padrão de elementos terras raras, em titanitas, da amostra PB-185 (unidade SLSI)

O padrão de enriquecimento observado é natural das titanitas, tipicamente são mais enriquecidas em terras-raras leves, pois esses elementos entram no sítio catiônico do Cálcio, na estrutura das titanitas, via substituição simples ($2\text{REE}^{3+} = 3\text{Ca}^{2+}$), ou então substituição acoplada ($(\text{Al,Fe})^{3+} + \text{REE}^{3+} = \text{Ca}^{2+} + \text{Ti}^{4+}$) (Hayden et al, 2007).

Foram realizadas algumas análises de centro-borda nas amostras estudadas, e nota-se que em geral, os centros são levemente mais enriquecidos principalmente nos elementos terras-raras leves, porém as bordas são mais enriquecidas em urânio, como indicado na figura 13, onde os resultados em preto representam as análises de centro enquanto os resultados em vermelho as análises de borda (figura 13).

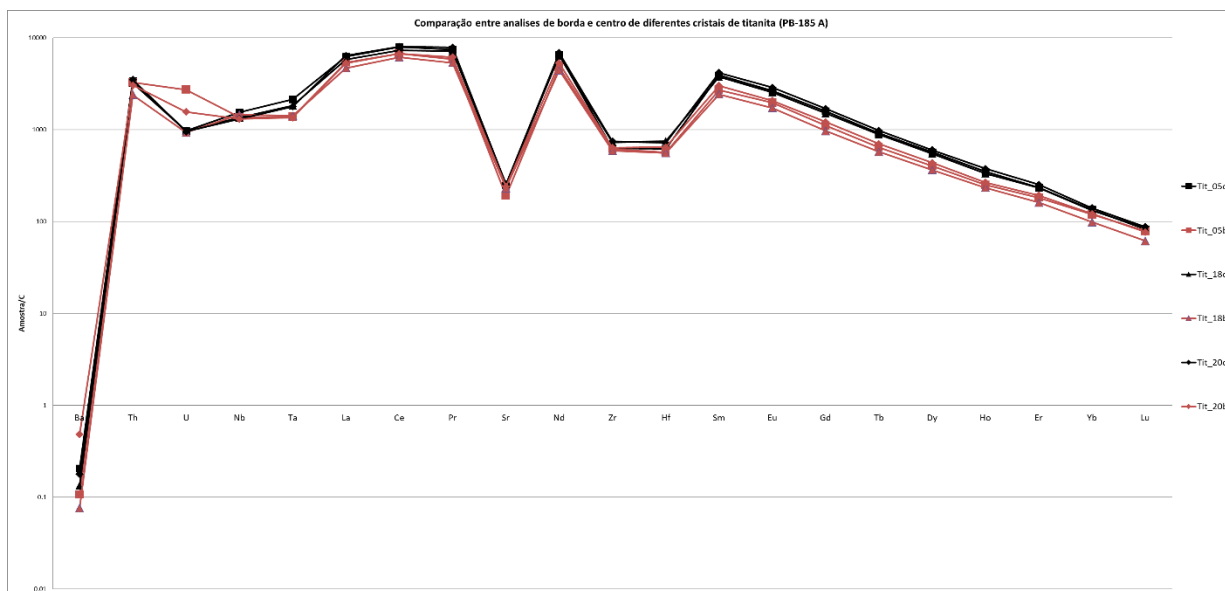
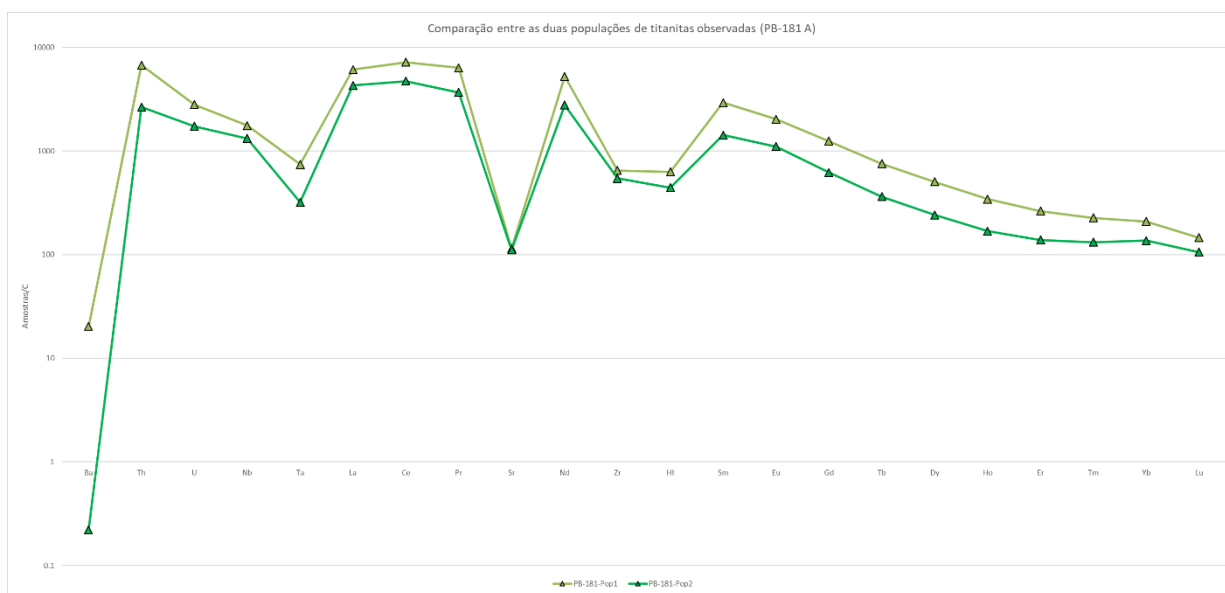
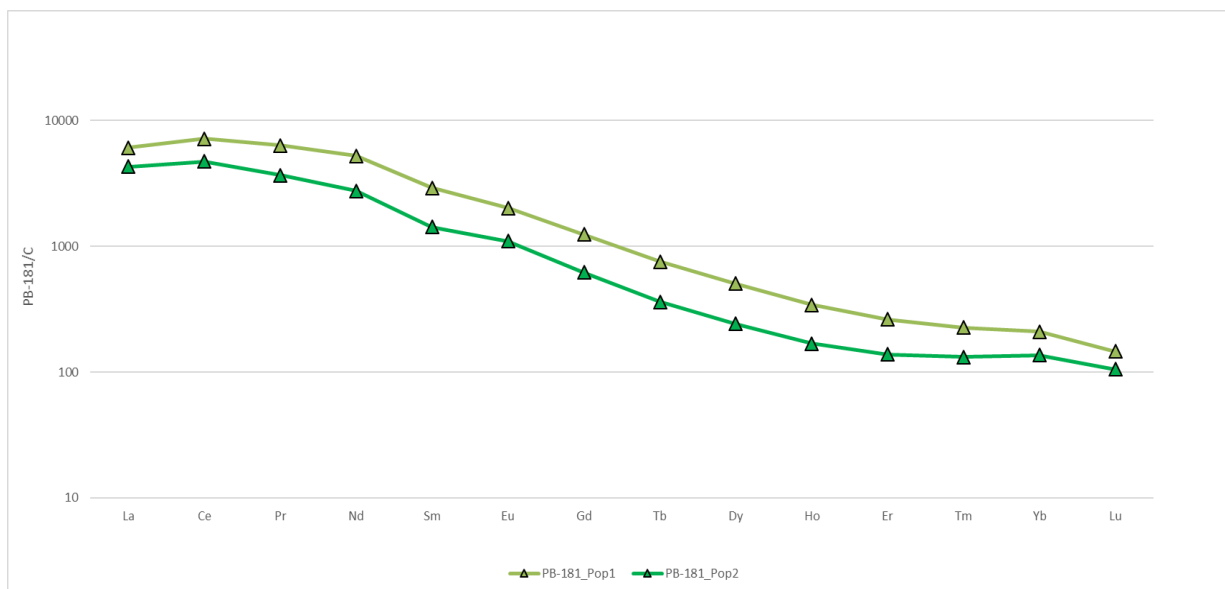


Figura 13: Comparação entre análises de centro e borda de diferentes cristais (PB-185)

Especificamente nas análises da amostra PB-181 A notou-se a presença de duas populações distintas de titanita, uma população menos enriquecida em elementos terras-raras, e outra com o enriquecimento mais acentuado, com valores próximos aos observados nas demais análises (figuras 14 e 15). Essa diferença observada pode ser fruto de características texturais diferenciadas entre as populações de titanita, no caso, diferenças entre cristais intersticiais (mais empobrecidos) de cristalização tardia e cristais precoces (mais enriquecidos).





Figuras 14 e 15: Comparação entre as duas populações de titanita observadas na amostra PB-181 A (diagrama superior – elementos traços normalizado por condrito; diagrama inferior – elementos terras raras normalizado por condrito)

7.3.2 Zircão

Utilizando o concentrado de zircão da amostra PB-123b, foi realizada uma montagem (Foto 01), feita no Laboratório de Preparação de Materiais, com alguns cristais (Imagem XYZ, abaixo), com o objetivo de se fazer análises de LA-ICP-MS, com o intuito de aplicar o método Ti em zircão, em busca das temperaturas de cristalização do mineral. Além da análise de ICP-MS a montagem de zircão também foi utilizada, para a realização de datações, pelo método U-Pb, com o objetivo de obter novas idades para o plúton Pedra Branca.

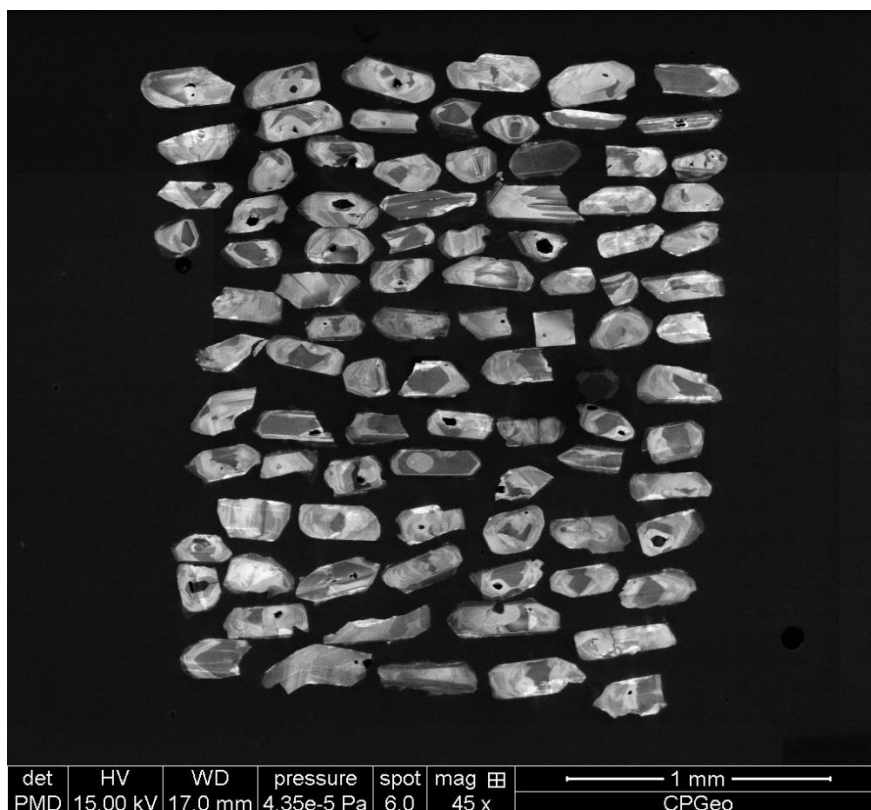


Foto 01: Imagem de cátodo-luminescência da montagem de zircões da amostra PB-123b, utilizada para LA-ICP-MS e datações U-Pb.

Em lâmina, os zircões da unidade supersaturada (SLS) são caracterizados pelo seu pequeno tamanho, inclusos em quase todas as fases minerais, indicando uma cristalização relativamente precoce em relação aos demais minerais que compõe a unidade supersaturada interna.

A partir dos resultados obtidos por LA-ICP-MS, foi analisado o comportamento dos padrões de fracionamento dos elementos terras raras, entre os cristais analisados. Nota-se que os zircões da unidade supersaturada apresentam padrões característicos, ou seja, forte enriquecimento em cério, em relação ao lantânio e praseodímio, fraca anomalia negativa de európio, e enriquecimento de elementos terras raras pesados em relação aos leves, como se observa na figura 16;

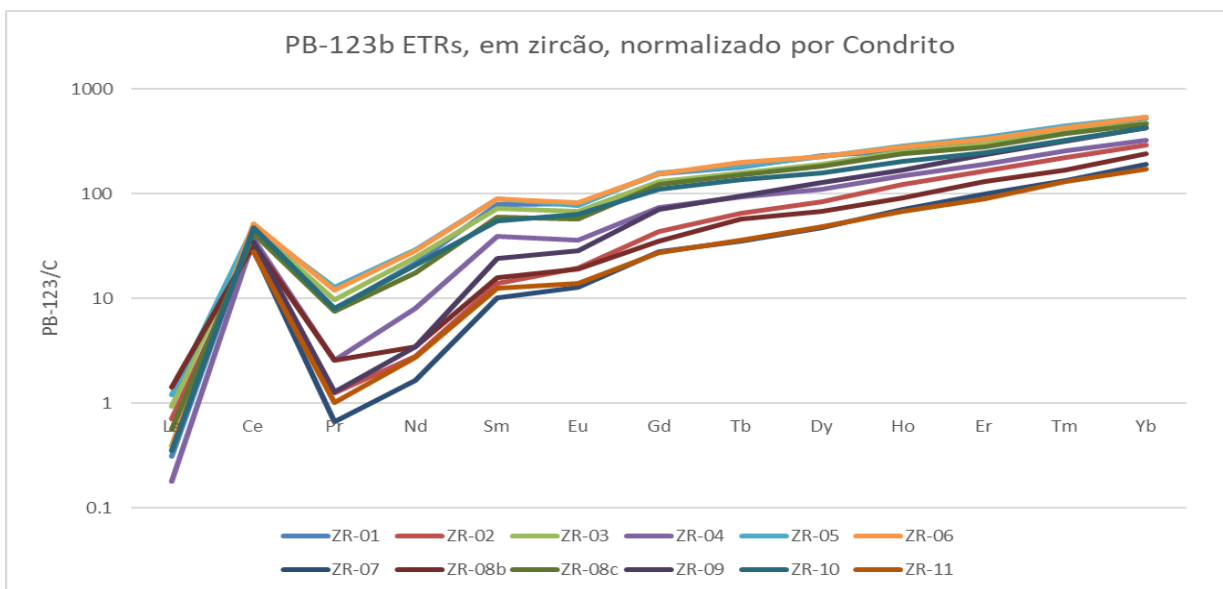


Figura 16: Padrões de elementos terras raras em zircão, amostra PB-123b (unidade SLS)

Durante a análise de titanita da amostra PB-181 A, foi possível realizar um par análises (centro e borda), em lâmina, de um cristal de zircão encontrado, os resultados estão apresentados na figura 17.

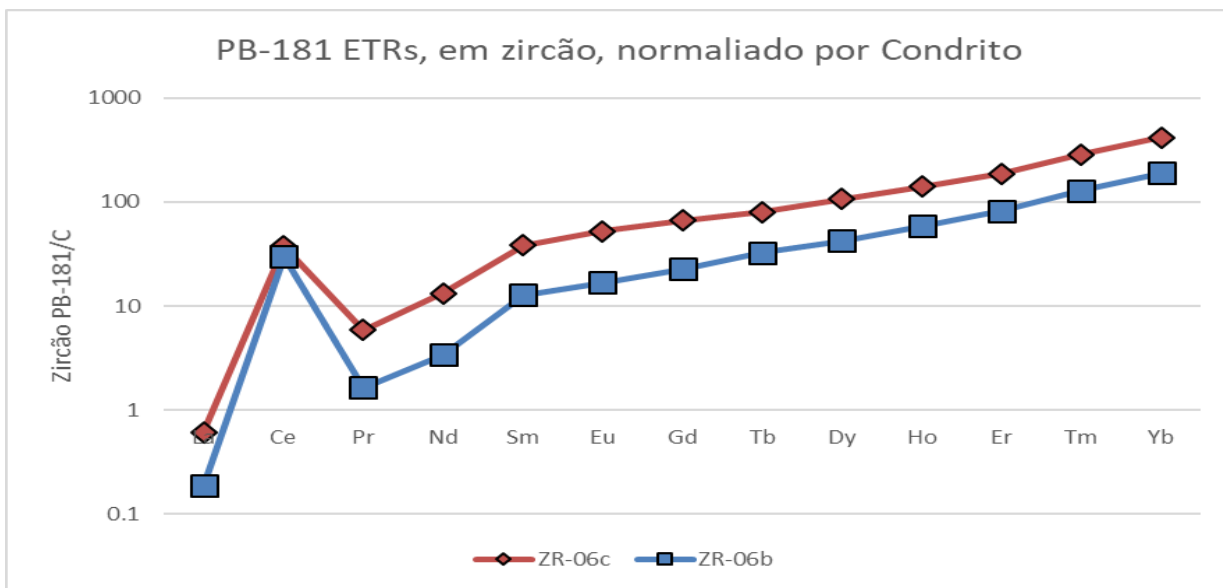


Figura 17: Padrões de elementos terras raras em zircão, amostra PB-181 (unidade SLSI)

Nota-se, portanto, que zircões da unidade SLSI também apresentam um forte enriquecimento em cério, em relação ao lantânio e praseodímio, além do maior enriquecimento em elementos terras raras pesados em relação aos leves, assim como foi observado nas análises da unidade SSL. Porém não se observa anomalia negativa de európio nas amostras da unidade SLSI, diferentemente dos resultados das amostras da unidade SSL, apresentados anteriormente.

7.4 Geocronologia U-Pb em zircão

A datação da amostra PB-123b foi realizada no Laboratório de Geocronologia de Alta Resolução da USP (GEOLAB), utilizando o método U-Pb em zircão, no equipamento Microsonda SHRIMP IIe (Sensitive High Resolution Ion Micro Probe).

Um dos objetivos da datação realizada é atualizar a idade atribuída ao plúton Pedra Branca, com datações mais recentes e precisas.

O resultado obtido foi de 594.7 ± 5.7 Ma, como indica a concórdia apresentada na figura 18;

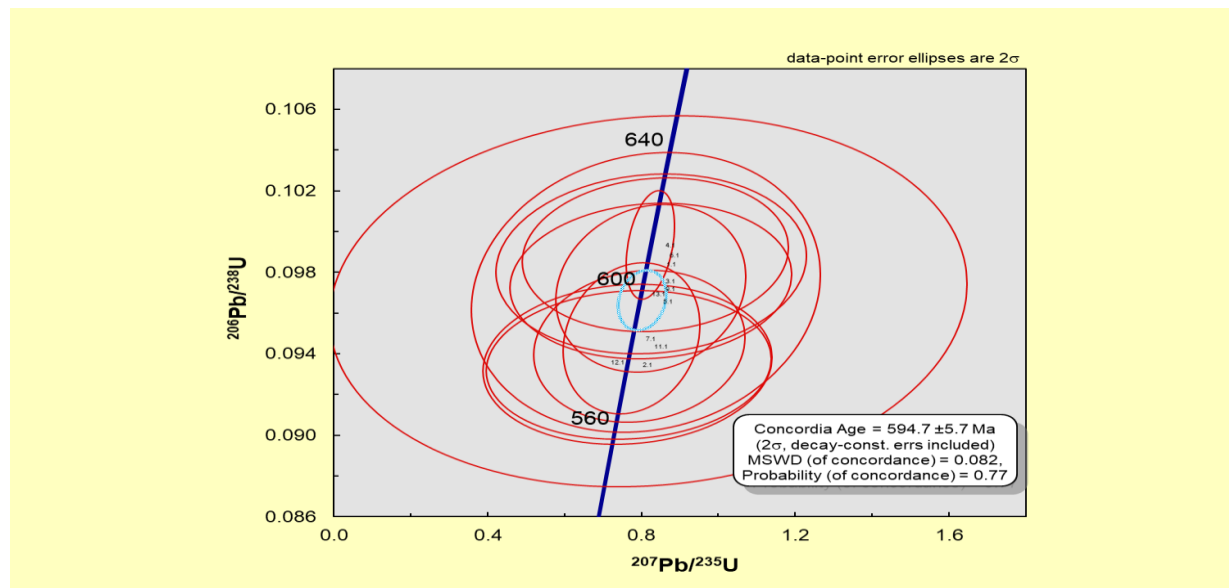


Figura 18: Concordia final com os resultados das datações realizadas (PB-123b)

Os resultados completos serão apresentados na forma de tabela, exibidos em anexo (Anexo IV) no final do trabalho.

8 DISCUSSÃO

8.1 Condições de oxidação a partir da composição da apatita e zircão

Determinar o estado de oxidação de magmas pode fornecer informações a respeito de processos magmáticos ocorridos durante a cristalização, ambiente tectônico de formação e até a respeito da composição química da rocha fonte.

O estudo do estado de oxidação de magmas durante sua cristalização é feito através da estimativa da fugacidade de oxigênio (fO_2), uma medida que avalia a capacidade do oxigênio de participar de reações durante a cristalização de um determinado magma. Geralmente se estima a fugacidade de oxigênio (fO_2) de um magma com base na razão Fe^{2+}/Fe^{3+} , seja em vidros vulcânicos ou em diferentes fases minerais principais, como anfibólios, por exemplo. Porém,

recentemente tem-se usado alguns minerais acessórios com o mesmo objetivo. A análise da concentração de elementos sensíveis a variações no estado redox do sistema, em minerais acessórios, por apresentarem mais de um estado de valência, como ferro ($\text{Fe}^{2+};\text{Fe}^{3+}$), manganês ($\text{Mn}^{2+};\text{Mn}^{3+}$), cério ($\text{Ce}^{3+};\text{Ce}^{4+}$) e európio ($\text{Eu}^{2+};\text{Eu}^{3+}$), está sendo utilizada como método para obter estimativas mais precisas das condições de oxidação de magmas de diferentes composições, onde os principais minerais acessórios utilizados são tipicamente apatita e zircão.

Segundo Miles et al (2014) é possível estimar a fugacidade de oxigênio de magmas graníticos a partir da concentração de manganês em apatita. O manganês é um elemento bivalente, ou seja, ocorre em mais de um estado de valência (tanto como Mn^{2+} como Mn^{3+}). Quando no estado Mn^{2+} , é possível substituir o cálcio (Ca^{2+}) na estrutura da apatita, devido a estados de valência iguais e raios atômicos semelhantes. Portanto, ainda segundo Miles (2014), a fugacidade de oxigênio de um determinado magma pode ser definida a partir de uma correlação linear negativa a partir da concentração de manganês presente na apatita, segundo a relação abaixo:

$$\log f\text{O}_2 = -0.0022(\pm 0.0003)\text{Mn}(\text{ppm}) - 9.75(\pm 0.46) \quad (1)$$

A partir dos dados obtidos através das análises de LA-ICP-MS, realizados em diferentes cristais de apatita, tentou-se aplicar os conceitos apresentados por Miles (2014) em seu artigo, calculando os valores de fugacidade de oxigênio a partir das concentrações medidas de manganês nas apatitas, seguindo a equação (1).

Para cada cristal analisado (em média de 10 cristais por amostra), foi calculado o seu respectivo valor do log da fugacidade de oxigênio, e em seguida calculado uma média por amostra, resultando nos valores apresentados na tabela a seguir:

PB-09 (SSI)																	
Element	AP01a	AP01b	AP01c	AP01d	AP03a	AP03b	AP03c	AP04a	AP04b	AP04c	AP04d	AP05a	AP05b	AP05c	AP05d	Média	Desv. P
Mn55 (ppm)	421.9	406.6	433.8	406.4	323.6	291.4	321.7	430.2	404.5	439.2	421.2	406.6	411.5	388.1	418.8	395.0	45.3
log fO2	-10.7	-10.6	-10.7	-10.6	-10.5	-10.4	-10.5	-10.7	-10.6	-10.7	-10.7	-10.6	-10.7	-10.6	-10.7	-10.6	0.1
PB-59-02 (SSI)																	
Element	AP01a	AP01b	AP01c	AP06a	AP06b	AP06c	AP06d	AP07a	AP07b	AP10a	AP10b	AP10c	AP12a	AP12b	AP12c	Média	Desv. P
Mn55 (ppm)	301.25	255.37	237.68	335.55	326.2	341.28	299.56	266.49	273.26	210.4	205.89	259.55	190.25	219.83	245.33	264.526	46.5
log fO2	-10.4	-10.3	-10.3	-10.3	-10.5	-10.5	-10.5	-10.3	-10.4	-10.2	-10.2	-10.3	-10.2	-10.2	-10.3	-10.3	0.1
PB-170 (enclave)																	
Element	AP01a	AP01b	AP01c	AP02b	AP3b	AP6b	AP9	AP10	AP11	AP12a	AP16	AP17	AP19	AP23	Média	Desv. P	
Mn55 (ppm)	492.7	253.0	227.9	253.1	246.1	229.9	228.6	241.9	275.1	240.3	240.2	235.7	238.1	243.9	260.45	65.5	
log fO2	-10.8	-10.3	-10.3	-10.3	-10.3	-10.3	-10.3	-10.3	-10.4	-10.3	-10.3	-10.3	-10.3	-10.3	-10.3	0.1	
PB-115 (enclave)																	
Element	AP01a	AP01b	AP01c	AP01d	AP01e	AP01f	AP02a	AP02b	AP03c	AP04a	AP06a	AP06b	AP08	Média	Desv. P		
Mn55 (ppm)	412.77	438.45	416.89	421.76	418.97	416.67	418.13	441.04	459.57	386.59	383.74	410.44	399.67	417.2838	20.1		
log fO2	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7	-10.8	-10.6	-10.6	-10.7	-10.6	-10.7	0.0		
PB-181 A (SLSI)																	
Element	AP01a	AP01b	AP02a	AP02b	AP03a	AP03b	AP04a	AP04b	AP07a	AP07b	AP09a	Média	Desv. P				
Mn55 (ppm)	355.49	331.62	283.00	246.33	279.87	268.34	297.02	308.32	276.71	272.51	277.91	290.65	29.5				
log fO2	-10.5	-10.5	-10.4	-10.3	-10.4	-10.3	-10.4	-10.4	-10.4	-10.3	-10.4	-10.4	0.1				
PB-185 (SLSI)																	
Element	AP02b_sp	AP03a	AP03b	AP04a	AP04b	AP05a	AP05b	AP06a_sp	AP06b_sp	AP07a	AP07b	Média	Desv. P				
Mn55 (ppm)	529.73	470.57	461.56	503.50	490.36	523.72	511.77	566.01	578.96	550.69	542.12	520.8	35.9				
log fO2	-10.9	-10.8	-10.8	-10.9	-10.8	-10.9	-10.9	-11.0	-11.0	-11.0	-10.9	-10.9	0.1				

Tabela 07: Resultados dos cálculos de fugacidade oxigênio

Apresentando as médias, em forma de gráfico, temos o resultado apresentado na figura 19, onde não se consegue caracterizar uma diferença sistemática em valores de fugacidade de oxigênio entre as unidades estudadas, visto que a diferença entre os maiores e menores valores registrados é pequena.

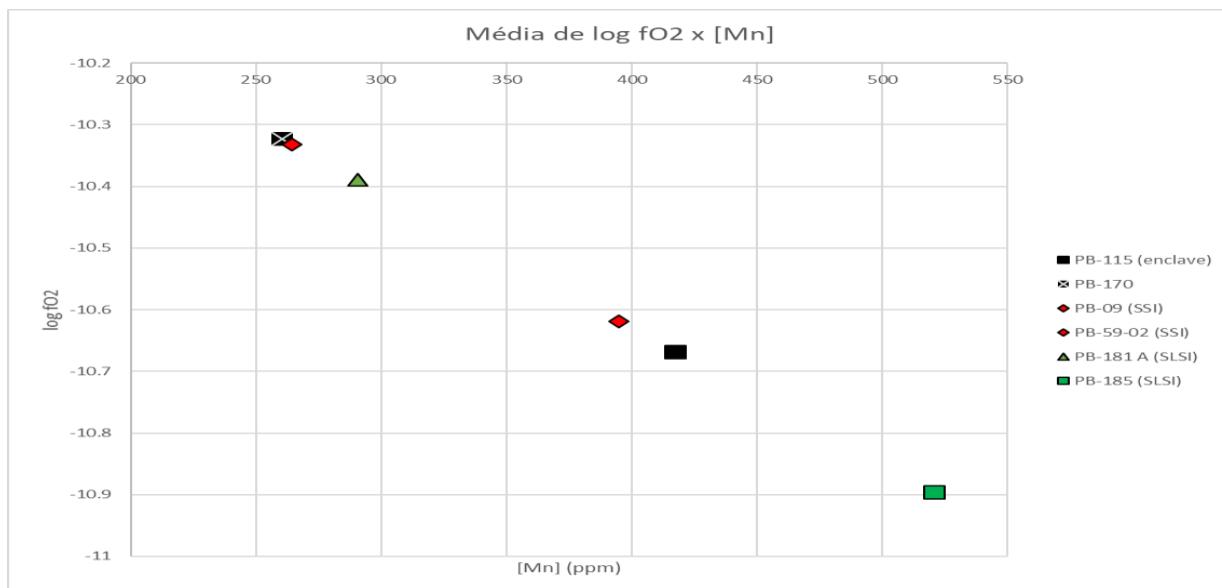


Figura 19: Valores de fugacidade de oxigênio entre cada unidade estudada

Como o método utilizado acima não apresentou resultados satisfatórios para uma caracterização, mesmo que qualitativa, das condições de oxidação entre as diferentes unidades

estudadas, foram calculadas as razões (Ce/Ce^*) e (Eu/Eu^*), onde Ce^* e Eu^* são valores teóricos esperados, da concentração de cério e európio normalizados, calculados para uma determinada amostra. O cálculo é feito, basicamente, através da média entre os valores normalizados dos elementos adjacentes ao Ce e Eu respectivamente, ou seja, $Eu^* = ([Sm] \times [Gd])^{1/2}$ e $Ce^* = ([La] \times [Pr])^{1/2}$. As razões (Ce/Ce^*) e (Eu/Eu^*) estimam a magnitude das anomalias de cério e európio, ou seja, razões com valores maiores que 1 representam anomalias positivas, enquanto que razões menores que 1 representam anomalias negativas do determinado elemento analisado. A tabela 8 apresenta, de maneira resumida, os resultados obtidos após o cálculo das razões de cério e európio para cada amostra analisada, os resultados completos serão apresentados na forma de tabelas em anexo (Anexo III).

PB-59 (SSI)	Média	PB-09 (SSI)	Média
Ce/Ce*	1.16	Ce/Ce*	1.12
Eu/Eu*	0.58	Eu/Eu*	0.70

PB-170	Média	PB-115 (enclave)	Média
Ce/Ce*	1.06	Ce/Ce*	1.08
Eu/Eu*	0.90	Eu/Eu*	0.87

PB-181 (SLSI)	Média	PB-185 (SLSI)	Média
Ce/Ce*	1.09	Ce/Ce*	1.07
Eu/Eu*	0.90	Eu/Eu*	0.93

PB-123 (SLS)	Média
Ce/Ce*	1.11
Eu/Eu*	0.80

Tabela 8: Resultados das razões (Ce/Ce^*) e (Eu/Eu^*) entre as diferentes unidades estudadas.

Os resultados a cima foram montados na forma de diagrama (figura 20), para facilitar a compreensão dos resultados obtidos;

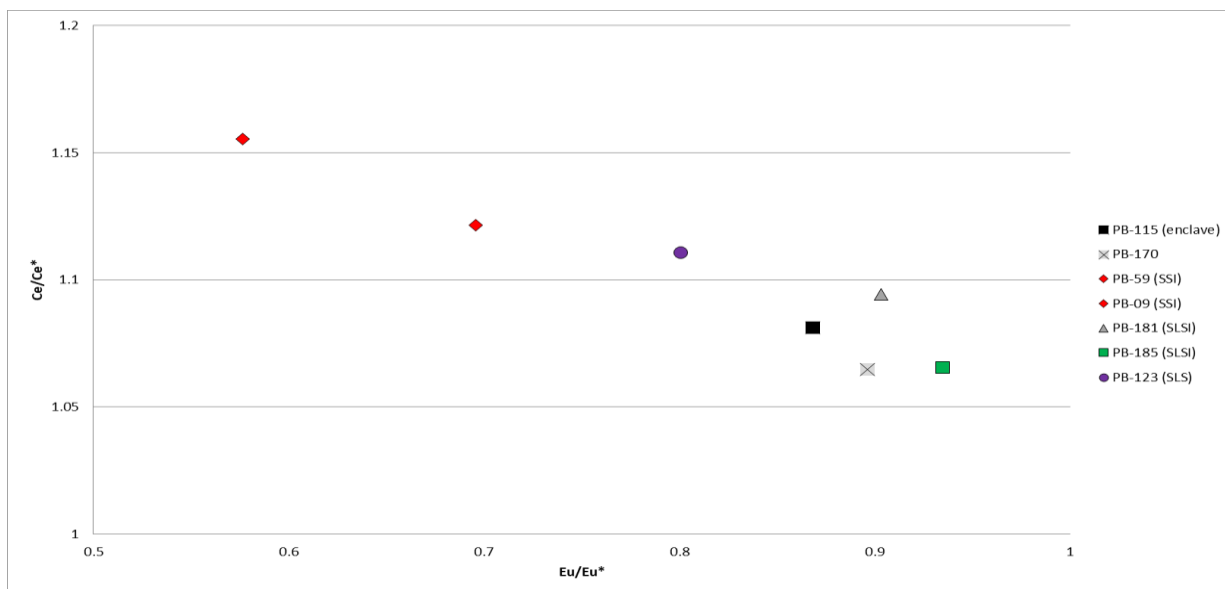


Figura 20: Relação entre as razões (Ce/Ce*) e (Eu/Eu*), em apatita, entre cada unidade analisada

Ao analisar a figura 20, nota-se que a unidade insaturada (SLSI) apresenta os maiores valores da razão ($\text{Eu}/\text{Eu}^* > 0.90$), porém os menores valores da razão ($\text{Ce}/\text{Ce}^* < 1.10$), representando uma anomalia negativa fraca de európio, e anomalia positiva moderada de cério, já a unidade supersaturada interna (SSI), apresenta resultados opostos aos da unidade insaturada, ou seja, razões ($\text{Eu}/\text{Eu}^* < 0.70$) e ($\text{Ce}/\text{Ce}^* > 1.10$) representando forte anomalia negativa de európio e anomalia positiva de cério moderada, enquanto que a unidade supersaturada (SLS, em verde) apresenta valores intermediários entre as unidades, ou seja, em termos de condições de oxidação, as razões observadas indicam que a unidade SLSI cristalizou sob condições mais oxidantes e a unidade SSI sob condições mais redutoras.

A partir das razões calculadas (Ce/Ce^* e Eu/Eu^*) e do diagrama gerado (figura 19), nota-se que existe uma divisão entre as diferentes unidades estudadas, a unidade supersaturada interna (SSI), em vermelho, apresenta valores mais elevados da razão (Ce/Ce^*) porém valores mais baixos da razão (Eu/Eu^*), indicando anomalia positiva de cério. A anomalia positiva de cério ocorre devido à incorporação, pela apatita, de Ce^{3+} , devido ao raio atômico do Ce^{3+} ser o mais compatível com a estrutura da apatita, fazendo com que seja incorporado uma concentração maior de cério do que seus elementos vizinhos (La e Pr). A anomalia negativa de európio ocorre devido ao fato de que o Eu^{2+} possui um raio atômico muito grande, impossibilitando sua entrada no mesmo sítio de seus elementos vizinhos (Sm e Gd) fazendo com que a apatita fique relativamente empobrecida em európio em relação aos demais elementos terras raras. Os baixos valores das razões (Eu/Eu^*) junto a razões mais elevadas de (Ce/Ce^*), característica da unidade SSI, indica um sistema mais favorável à presença de Ce^{3+} e Eu^{2+} , em detrimento de seus pares

de valência mais elevada (Ce^{4+} e Eu^{3+}), o que indica um sistema mais reduzido quando comparado com as demais unidades analisadas (SSL, SLSI).

A evidente diferença entre as condições de oxidação das unidades estudadas, apresentada na figura 20, não se mostra presente nos resultados obtidos utilizando o método Mn em apatita, apresentados anteriormente (diagrama 02). Uma possível explicação para a ineficiência do método utilizado (Mn em apatita) nas amostras estudadas do plúton Pedra Branca é que segundo Miles et al (2014), o fracionamento de manganês em apatita é fortemente influenciado pela elevada atividade de SiO_2 no sistema. Miles et al (2014) demonstram, a partir de experimentos empíricos, que a concentração de manganês em apatita de zonas ricas em sílica chega a ser 27 vezes superior em relação a zonas mais pobres em sílica. No caso do plúton Pedra Branca, a atividade de sílica é baixa em todas as unidades, ou seja, o fracionamento do manganês talvez tenha ocorrido preferencialmente para outra fase mineral e não para a apatita, além disso, como todas as unidades do Sienito Pedra Branca apresentam a mesma característica (de baixa atividade de sílica, ao longo da maior parte de sua cristalização), não se observam grandes variações na concentração de manganês entre apatitas de diferentes unidades, fazendo com que o método talvez não seja o mais adequado dentro do contexto geoquímico do plúton.

Ao observar os resultados de zircão das duas unidades analisadas, nota-se algumas semelhanças, como o forte enriquecimento em cério, além do maior enriquecimento de elementos terras raras pesados em relação aos leves. Porém uma das principais diferenças observadas é a presença de anomalia negativa de európio nas amostras da unidade supersaturada (SLS; PB-123) e ausência da mesma anomalia de európio nas amostras da unidade insaturada a saturada (SLSI; PB-181), como pode se observar na figura 21:

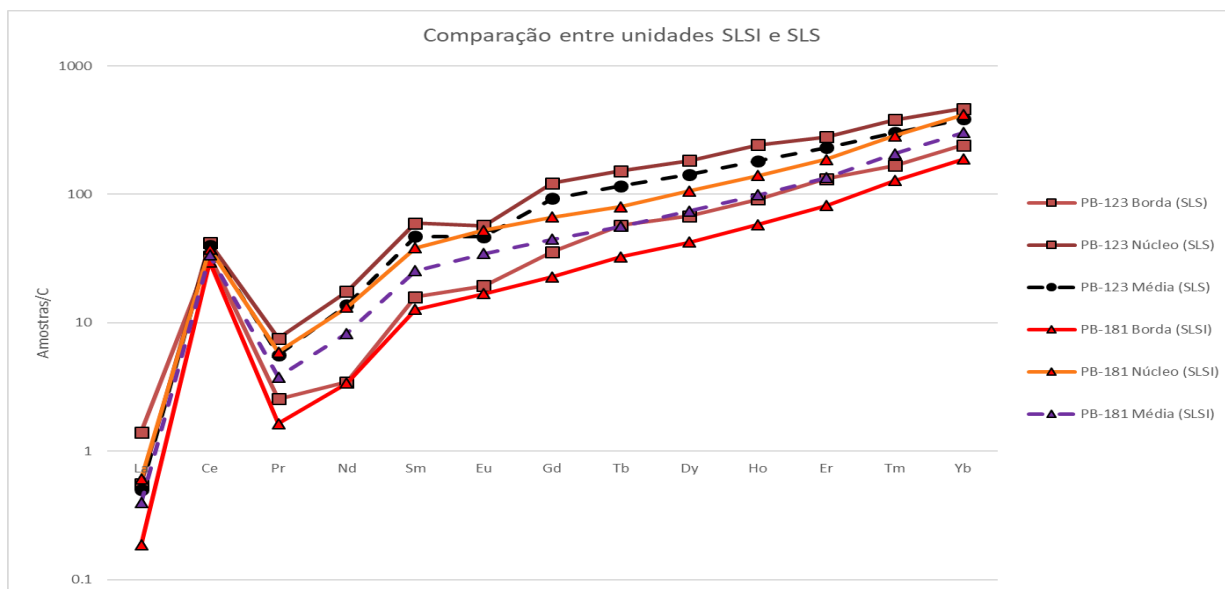


Figura 21: Comparação entre padrões de fracionamento de elementos terras raras, em zircão, entre unidades estudadas

A ausência da anomalia negativa de európio nas amostras da unidade insaturada, é indicativo de condições mais oxidantes de cristalização, favorecendo a presença de Eu^{3+} em relação ao Eu^{2+} no sistema, fazendo com que os zircões incorporem uma maior quantidade do elemento em relação aos zircões cristalizados na unidade supersaturada, onde as condições são mais redutoras e a proporção de Eu^{2+} é maior.

Eu^{2+} não entra na estrutura do zircão, enquanto que Eu^{3+} é incorporado pelo zircão junto com os demais elementos terras raras de mesma valência, portanto quando em sistemas mais oxidados, onde a proporção de Eu^{3+} é mais elevada, a anomalia negativa de európio é menos evidente ou totalmente inexistente (caso da unidade SLSI), enquanto que em sistemas menos oxidados a anomalia negativa de európio é mais pronunciada (caso da unidade SLS).

Os resultados apresentados no presente trabalho são concordantes com os resultados obtidos por Carvalho & Janasi (2012); onde é demonstrado, com base na composição dos minerais principais, que as unidades mais centrais do plúton (SSI e SSL) apresentam características geoquímicas e mineralógicas típicas de magmas mais redutores, em relação à unidade da borda (SLSI). Carvalho & Janasi (2012) demonstram que a unidade insaturada (SLSI) apresenta óxidos de ferro e titânio com conteúdo de hematita mais elevados que as demais unidades, indicando cristalização sob condições mais oxidantes, além disso a composição dos piroxênios difere entre unidades. A unidade externa (SLSI) é caracterizada pela presença de egrina-augita, piroxênio com Fe^{3+} em sua composição, enquanto que as zonas internas apresentam diopsídio como principal piroxênio, essa diferença composicional entre os piroxênios

é mais um indicativo de diferenças nas condições de oxidação entre as unidades do plúton Pedra Branca.

8.2 Temperaturas de cristalização do zircão

Zircão é, possivelmente, o mineral acessório mais amplamente utilizado em estudos de geologia, sendo a fonte de estudos em trabalhos de geoquímica, geocronologia, geologia isotópica entre outros. No presente trabalho foi utilizado o método de titânio em zircônio (geotermômetro), com o objetivo de determinar a temperatura de cristalização de zircão em diferentes unidades do plúton Pedra Branca. Nota-se que a temperaturas de saturação em zircão não foi calculada pois a composição do Sienito Pedra Branca não é compatível com as composições para as quais a calibração de Watson & Harrison (1983) foi feita.

O estudo foi baseado no artigo publicado por Ferry & Watson (2007), onde os autores determinam que o conteúdo de titânio em zircão é diretamente correlacionado com sua temperatura de cristalização, visto que a entrada de titânio (Ti^{4+}) ocorre a partir da substituição de Si^{4+} por Ti^{4+} na estrutura do zircão, e esta substituição é dependente apenas da temperatura de cristalização do cristal e das atividades de titânio e sílica do sistema.

Ferry & Watson (2007) apresentam uma equação que relaciona concentração de titânio em zircão em função da temperatura de cristalização e dos valores de atividade de sílica e titânio do sistema, possibilitando o cálculo de temperatura de cristalização de zircões cristalizados em magmas de diferentes composições. A equação mencionada será apresentada a seguir:

$$\log (\text{ppm Ti-in-zircon}) = (5.711 \pm 0.072) - ((4800 \pm 86) / T(\text{K}) - \log \alpha_{\text{SiO}_2} + \log \alpha_{\text{TiO}_2}) \quad (4)$$

A equação acima foi utilizada para a realização de todos os cálculos de temperatura de cristalização de zircão realizados no presente trabalho.

Utilizando o artigo de Ferry & Watson (2007) e os dados obtidos por LA-ICP-MS, buscou-se estimar as temperaturas de cristalização do zircão no contexto da unidade supersaturada (SLS), aplicando-se a equação (4), demonstrada na bibliografia citada. Isolando a temperatura como incógnita de interesse, obtém-se a equação (5) abaixo;

$$T (^{\circ}\text{C}) = (4800) / (5.711 - (\log ([\text{Ti}]_{\text{Zir}}, \text{ppm}) + (\log \alpha_{\text{SiO}_2} - (\log \alpha_{\text{TiO}_2})) - 273.15 \quad (5)$$

Onde $T (^{\circ}\text{C})$ é o valor da temperatura de cristalização calculada em graus Celsius; $[\text{Ti}]_{\text{Zir}}$ é a concentração (em ppm) de titânio no zircão analisado; α_{SiO_2} é a atividade de sílica estimada (entre 0 e 1) e α_{TiO_2} é a atividade de titânio estimada (entre 0 e 1). Da mesma maneira em que

foi utilizado para o cálculo das temperaturas de cristalização das titanitas, abordado anteriormente, as atividades de sílica e titânio utilizadas para os cálculos foram estimadas a partir das características texturais da amostra PB-123b. Foi adotado um valor de **0.8** para a atividade de sílica (αSiO_2), e de **0.6** para a atividade de titânio (αTiO_2).

Os resultados obtidos aplicando-se a equação (5) e os parâmetros de atividade de titânio e sílica descritos acima estão apresentados na tabela 9;

PB-123b (SLS)													
Element	ZR-01	ZR-02	ZR-03	ZR-04	ZR-05	ZR-06	ZR-07	ZR-08b	ZR-08c	ZR-09	ZR-10	ZR-11	Média
Ti49	34.78	18.17	43.2	33.28	39.02	35.86	24.82	29.44	37.7	14.97	36.7	25.58	31.13
T (°C)	878	805	905	873	892	882	839	859	888	785	885	842	861

Tabela 9: Temperaturas de cristalização dos cristais de zircão analisados (amostra PB-123; unidade SSI); em **vermelho** temperaturas acima da média calculada, em **azul** temperaturas abaixo da média e em **verde** as análises de borda e em **laranja** as análises de núcleo do mesmo cristal.

Também foram calculadas as temperaturas de cristalização dos zircões da amostra PB-181 A, adotando-se os mesmos parâmetros utilizados nos cálculos de temperatura de cristalização das titanitas analisadas da mesma unidade, ou seja, valor de atividade de sílica (αSiO_2) igual à **0.6** e valor de atividade de titânio igual à **0.8**, e utilizando a equação (5) descrita acima, obtendo-se os resultados da tabela 10;

PB-181 A		
Element	ZR_06b	ZR_06c
Ti49 (ppm)	24	29
T (°C)	834	857

Tabela 10: Temperaturas de cristalização dos cristais de zircão analisados (amostra PB-181; unidade SLSI)

Nota-se que a temperatura de cristalização do zircão, tanto na unidade insaturada (SLSI) como na unidade supersaturada (SLS) é semelhante, registrando um intervalo de apenas 16°C entre as temperaturas médias de cristalização das duas unidades. Em geral os zircões das duas unidades (SLSI e SLS) apresentam características em comum; todos cristalizados em uma faixa de temperatura semelhante (entre $\pm 800^\circ\text{C}$ e 900°C), como mostram as tabelas de temperatura de cristalização apresentadas anteriormente (Tabelas 14 e 15).

8.3 Temperatura de cristalização de titanita

Hayden et al (2007), utilizam titanita como termobarômetro em sistemas de alta temperatura e pressão. O princípio estudado por Hayden et al, tem como base a substituição do titânio (Ti^{4+})

das titanitas (CaTiSiO_5) por zircônio (Zr^{4+}). É demonstrado que a proporção desta substituição depende principalmente da temperatura (diretamente proporcional) e da pressão (inversamente proporcional) do sistema, e os autores concluem que a concentração de zircônio em titanitas pode ser definida a partir de uma relação log-linear, sendo ela:

$$\log(\text{Zr}, \text{ppm}) = (10.52(\pm 0.10) - \left(\frac{7708(\pm 101)}{T(K)}\right) - 960(\pm 10) \left(\frac{P(\text{GPa})}{T(K)}\right) - \log(\alpha_{\text{TiO}_2}) - \log(\alpha_{\text{SiO}_2})) \quad (2)$$

Onde, α_{SiO_2} se refere a atividade de sílica no sistema e α_{TiO_2} se refere a atividade de titânio no sistema. Segundo os autores, a presença de quartzo em sistemas naturais, em equilíbrio, define um sistema com atividade de sílica elevada, com valores próximos a 1, enquanto que a presença de rutilo em equilíbrio define um sistema com atividade de titânio elevada, com valores próximos a 1. No caso de rutilo ausente, a presença de titanita em equilíbrio é atribuída a valores de atividade de titânio elevadas, porém menores que 1 (entre 0,6 e 0,8).

Portanto, para a realização de estimativas de temperatura do sistema, com base nas concentrações de zircônio das titanitas, a seguinte equação é utilizada:

$$T(^{\circ}\text{C}) = \left(\frac{7708 + 960P}{10.52 - \log(\alpha_{\text{TiO}_2}) - \log(\alpha_{\text{SiO}_2}) - \log(\text{Zr}, \text{ppm})}\right) - 273 \quad (3)$$

Hayden et al (2007) ainda demonstra, que apesar das titanitas apresentarem naturalmente elevados teores de elementos terras-raras (principalmente terras raras leves), o seu conteúdo não afeta a proporção de substituição de titânio por zircônio, portanto não interfere nas estimativas de temperatura realizadas, e conclui que o uso deste método, se realizado dentro dos parâmetros utilizados nas calibrações (sistema com elevada atividade de sílica e titânio), pode apresentar incertezas de até $\pm 10^{\circ}\text{C}$, que são valores de incerteza baixos, visto que o método é utilizado para sistemas de alta temperatura.

Com base no artigo de Hayden et al (2007), e nos resultados das análises de ICP-MS por Laser Ablation, foram estimadas as temperaturas de cristalização dos cristais estudados, utilizando a equação **(3)**, extraída da bibliografia citada.

Foi utilizado um valor de pressão de 3.8 kbar para os cálculos, extraído de Carvalho & Janasi (2012), em que este valor médio foi obtido utilizando geobarometria de alumínio em hornblenda. Os valores de atividade de sílica e titânio foram estimados com base no próprio artigo de Hayden et al (2007) e na tese de mestrado de Deans (2010), que estimam ambos os valores de atividade, tanto de sílica quanto de titânio, com base nas características texturais (principalmente da titanita) e mineralógicas das amostras estudadas.

No presente trabalho, a atividade de sílica (a_{SiO_2}) utilizada para os cálculos de temperatura da unidade insaturada a saturada (SLSI) foi de **0.6**, devido à ausência de quartzo nas amostras e rara presença de nefelina descrita por Carvalho (2011), enquanto que para a unidade supersaturada (SLS) foi adotado um valor de **0.8**, pois foi descrito, em bibliografia estudada, quartzo intersticial, tardio, em algumas das unidades SSI e SLS. Já para o valor da atividade de titânio (a_{TiO_2}) adotado **0.8** para a unidade SLSI e **0.6** para a unidade SLS. O valor **0.8** foi adotado como mais representativo da unidade insaturada a saturada, pois as amostras estudadas apresentam titanitas bem desenvolvidas e em grande quantidade, além da ausência de rutilo (mineral que se presente em equilíbrio define uma atividade de titânio igual a 1 (Hayden, 2007)), enquanto que as amostras da unidade supersaturada (SLS) apresentam titanitas intersticiais, pouco desenvolvidas e sempre associadas a minerais opacos, portanto foi adotado um valor mais baixo, de **0.6**.

As temperaturas (em graus Celsius) calculadas utilizando o método de zircônio em titanita e os parâmetros descritos acima estão apresentados em forma de tabela, tabelas 11 a 15:

PB-8A (SLSI)											
Element	Tit_1	Tit_2	Tit_3	Tit_4	Tit_5n	Tit_5b	Tit_6	Tit_7	Tit_8	Média	Desv. P
Zr91	5360.5	4837.9	5047.0	4648.0	5262.6	4850.5	6768.5	6132.5	5780.8	5409.8	657
Estimativa de temperatura p/ $a_{TiO_2} = 0.8$ e $a_{SiO_2} = 0.6$											
P = 3.8kb	811	804	807	802	810	805	827	820	816	812	8

Tabela 11: Estimativas de temperatura dos cristais de titanita da amostra PB-8A (unidade SLSI); em azul, temperaturas inferiores à média, em vermelho, temperaturas superiores à média e em verde, temperaturas de núcleo e borda do mesmo cristal.

PB-115 (enclave)														
Element	Tit_2	Tit_5	Tit_6c	Tit_7	Tit_9	Tit_10	Tit_12	Tit_15	Tit_17c	Tit_7b	Tit_18	Tit_19	Média	Desv. P
Zr91	3838	4221	3595	6238	3979	3373	3946	3669	4009	3590	5108	7440	4417	1187
Estimativa de temperatura p/ $a_{TiO_2} = 0.8$ e $a_{SiO_2} = 0.6$														
P = 3.8kb	840	846	835	873	842	831	842	837	843	835	859	886	847	16

Tabela 12: Estimativas de temperatura dos cristais de titanita da amostra PB-115 (enclave máfico); em azul, temperaturas inferiores à média, em vermelho, temperaturas superiores à média e em verde, temperaturas de núcleo e borda do mesmo cristal.

PB-123 (SLS)										
Element	Tit_1	Tit_2	Tit_3	Tit_4	Tit_5	Tit_6	Tit_7	Tit_8	Média	Desv. P
Zr91	1400.9	1062.61	1229.86	1343.29	1319.6	1468.12	1427.03	1120.34	1296.5	137
Estimativa de temperatura p/ $a_{TiO_2} = 0.6$ e $a_{SiO_2} = 0.8$										
P = 3.8kb	729	714	722	727	726	732	730	717	724	6

Tabela 13: Estimativas de temperatura dos cristais de titanita da amostra PB-123b (unidade SLSI); em azul, temperaturas inferiores à média, em vermelho, temperaturas superiores à média.

PB-181 A (SLSI)											
Element	Tit_01	Tit_03	Tit_04	Tit_05	Tit_09	Tit_11	Tit_15	Tit_16	Tit_20	Avg	Desv. P
Zr91	3534	2302	2965	2152	3514	2499	5235	5009	3924	3459	1054
Estimativa de temperatura p/ aTiO2 = 0.8 e aSiO2 = 0.6											
P = 3.3kb	834	807	823	803	834	812	861	858	841	830	20

Tabela 14: Estimativas de temperatura dos cristais de titanita da amostra PB-181 (unidade SLSI); em azul, temperaturas inferiores à média, em vermelho, temperaturas superiores à média.

PB-185 (SLSI)																
Element	Tit_02	Tit_06	Tit_07	Tit_14	Tit_15_1	Tit_15_2	Tit_15_3	Tit_16	Tit_17	Tit_18c	Tit_18b	Tit_19	Tit_20c	Tit_20b	Média	Desv. P
Zr91	3726	5572	3633	3708	6363	3985	2919	4148	3555	4033	3268	3548	4143	3541	3936	875
Estimativa de temperatura p/ aTiO2 = 0.8 e aSiO2 = 0.6																
P = 3.8kb	838	865	836	837	875	842	822	845	835	843	829	835	845	834	840	13

Tabela 15: Estimativas de temperatura dos cristais de titanita da amostra PB-185 (unidade SLSI); em azul, temperaturas inferiores à média, em vermelho, temperaturas superiores à média, e em verde temperaturas de núcleo e borda do mesmo cristal.

Fica evidente que as temperaturas de cristalização das titanitas dentro da unidade insaturada (SLSI), representada pelas amostras PB-08 A, 181 e 185, são muito semelhantes e registram um intervalo de cristalização pequeno, como indicado na tabela 16. A temperatura de cristalização das titanitas da unidade SLS é bem inferior ($\pm 724^{\circ}\text{C}$), essa grande diferença na temperatura de cristalização entre unidades pode estar relacionada à diferença textural descrita; enquanto que na unidade SLSI a titanita é caracterizada por ser um mineral de cristalização em fase principal (cristais individuais, subédrico), na unidade SLS é caracterizada por ser um mineral tardio (sempre associado a opacos ou minerais máficos, anédrica).

Amostra	T Média(°C)	Variação Máx. (°C)
PB-08 (SLSI)	812	25
PB-181 (SLSI)	830	58
PB-185 (SLSI)	840	53
Núcleo (SLSI)	844	-
Borda (SLSI)	833	-
PB-123b (SLS)	724	18
PB-115 (enclave)	847	54

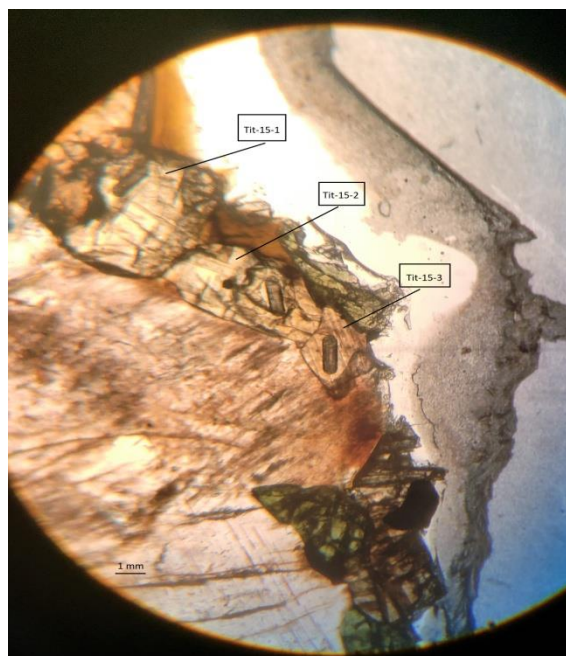
Tabela 16: O Relação entre temperaturas de cristalização de diferentes unidades

É importante ressaltar que as temperaturas calculadas a partir das titanitas analisadas não representam as temperaturas de líquidus das unidades estudadas, visto que a titanita não se trata de um mineral precoce, de início de cristalização, mas sim se cristaliza em fase principal a tardia. A temperatura de início de cristalização foi calculada por Carvalho & Janasi (2012), utilizando apatita como mineral de estudo, este sim se tratando de um mineral precoce e mais abundante

nas diferentes unidades do plúton Pedra Branca. Os resultados apresentados em seu artigo mostram temperaturas de início de cristalização entre 1060°C e 1090°C para as diferentes unidades estudadas.

Com as temperaturas de cristalização calculadas, procurou-se estabelecer as diferenças texturais, entre cristais de diferentes temperaturas. Notou-se que, em geral, os cristais de temperaturas mais elevadas, além de apresentarem tamanhos maiores também são caracterizados por uma coloração mais clara em relação aos cristais de temperaturas mais baixas, e esta relação pode ser observada na Foto 02.

Foto 02: Foto da amostra PB-185, representando a relação entre os cristais de titanita; Tit-15-1 (895°C), Tit-15-2 (862°C) e Tit-15-3 (841°C). Polarizadores descruzados; aumento de 4x.



8.4 Evolução composicional do zircão e da titanita

Procurou-se analisar o efeito da temperatura na química dos zircões estudados da amostra PB-123. É importante ressaltar que, todos os diagramas que serão apresentados estabelecem uma correlação entre a temperatura de cristalização e a concentração de determinado elemento de interesse, e que esta relação é equivalente a correlações entre concentração de titânio e concentrações do elemento de interesse, visto que a equação da temperatura (eq. 5) é dada em função apenas da concentração de titânio na amostra estudada, portanto, com o intuito de facilitar a interpretação dos dados apresentados, todos os diagramas de correlação serão apresentados em função da temperatura calculada, em vez de utilizar a concentração de titânio, a figura 22 ilustra a semelhança entre os dois métodos de apresentação dos resultados:

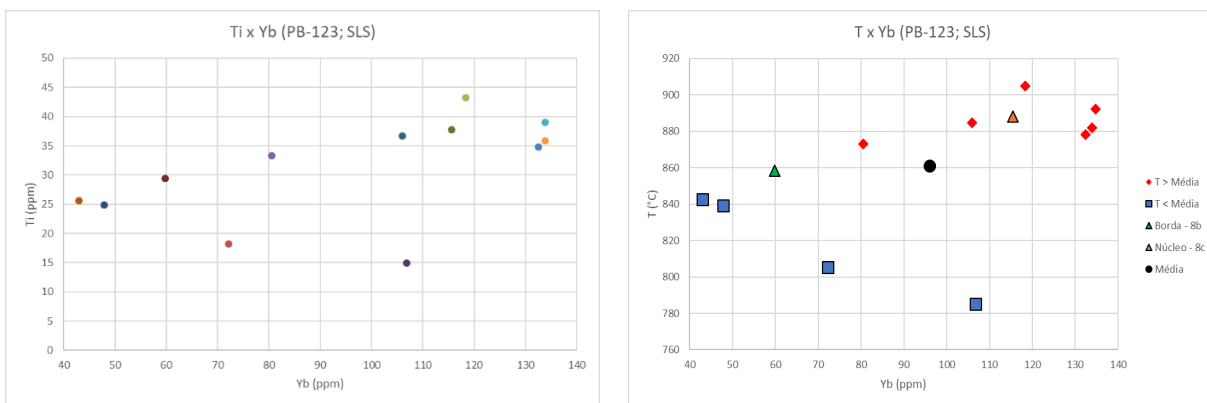


Figura 22: À esquerda [Ti] x [Yb] em cada amostra analisada, e à direita Temperatura x [Yb], indicando a semelhança na apresentação dos resultados

Ficou evidente, ao analisar os diagramas apresentados abaixo, que temperaturas mais elevadas registram composições mais enriquecidas, principalmente no caso de elementos terras raras, como cério. Nota-se que cristais de zircão cristalizados em temperaturas mais elevadas apresentam concentrações duas a três vezes superiores, de diferentes elementos, quando comparado à cristais de temperaturas mais baixas. A grande diferença na concentração de diferentes elementos, entre os cristais analisados, está associada a pequenas variações de temperatura (de 60°C a 80°C), como indicado nas figuras 23 a 26;

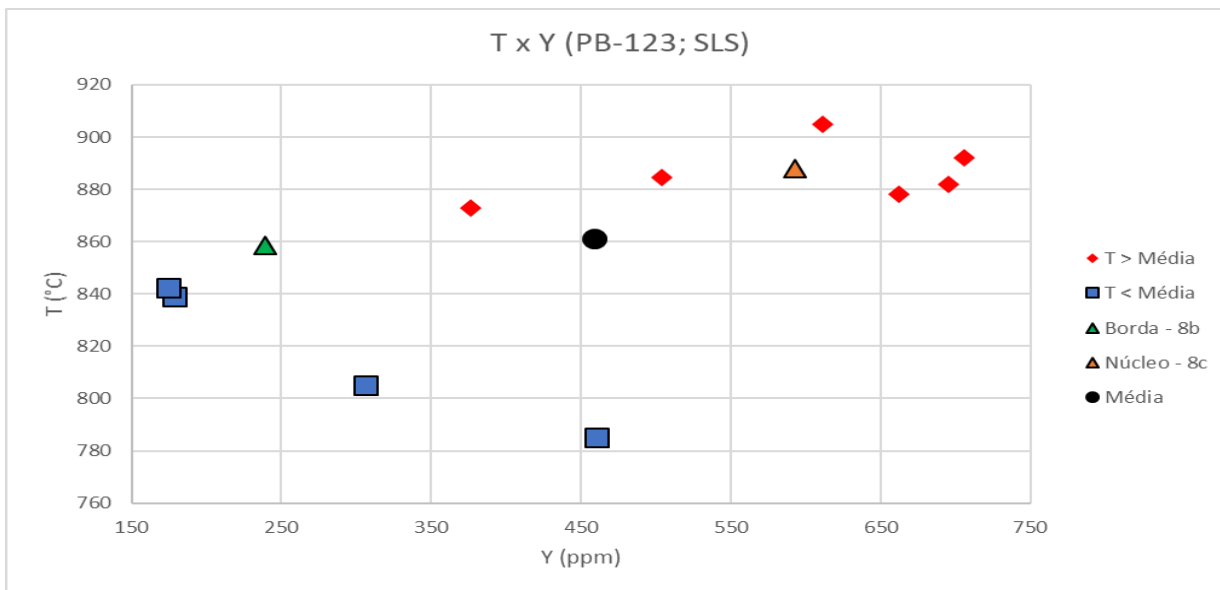


Figura 23: Correlação entre temperatura de cristalização (°C) e concentração de Y (ppm)

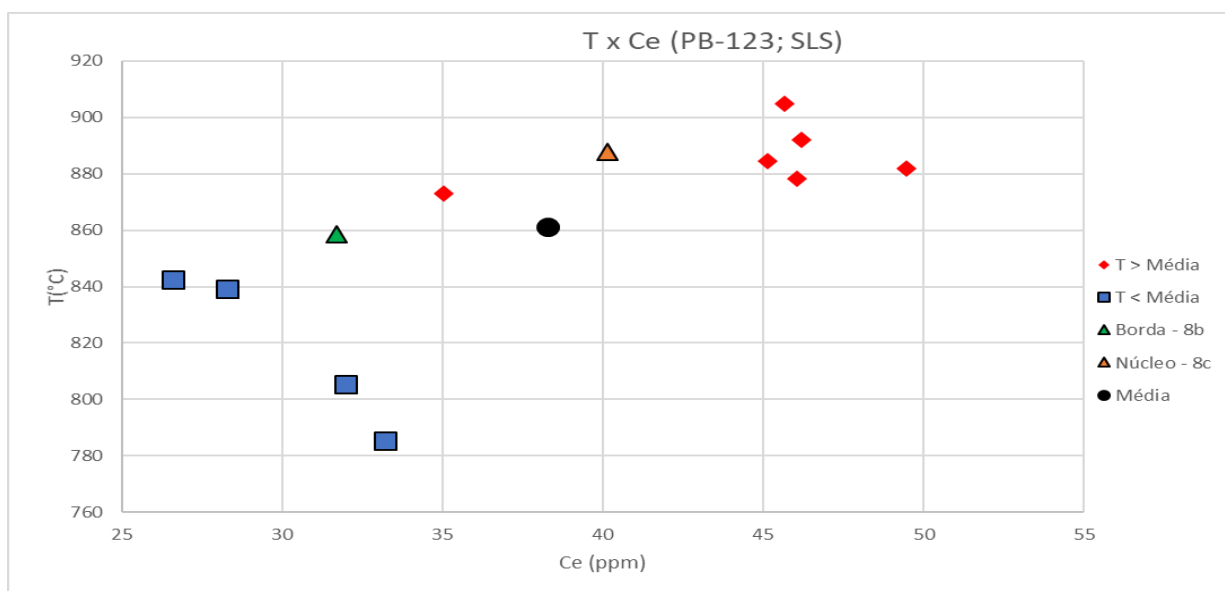


Figura 24: Correlação entre temperatura de cristalização ($^{\circ}\text{C}$) e concentração de Ce (ppm) (PB-123; SLS)

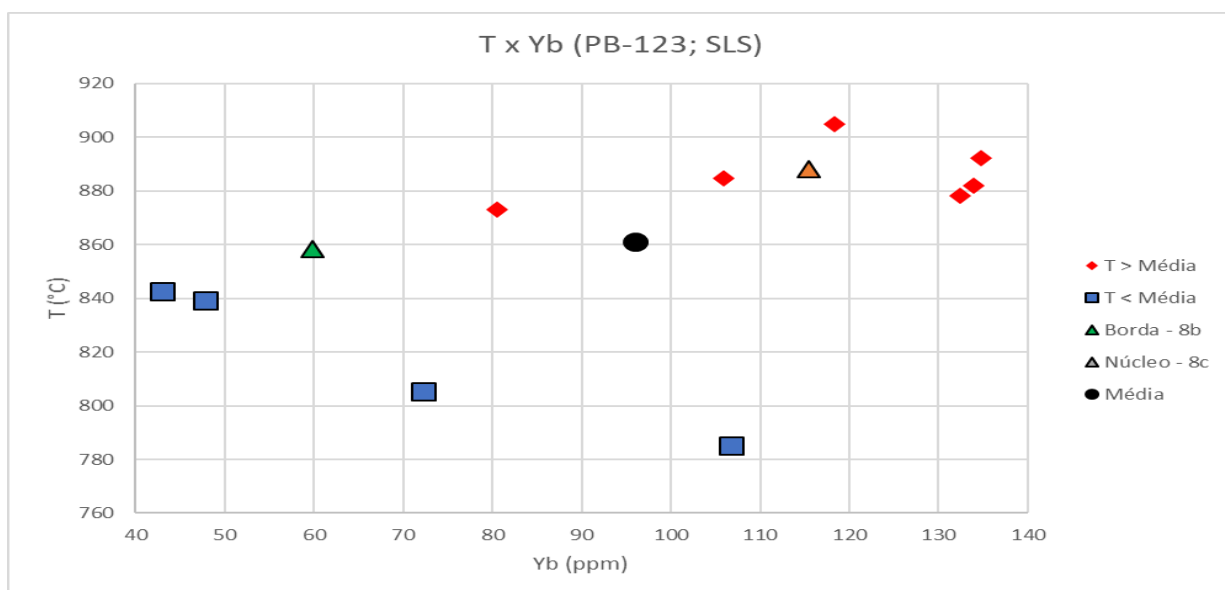


Figura 25: Correlação entre temperatura de cristalização ($^{\circ}\text{C}$) e concentração de Yb (ppm) (PB-123, SLS)

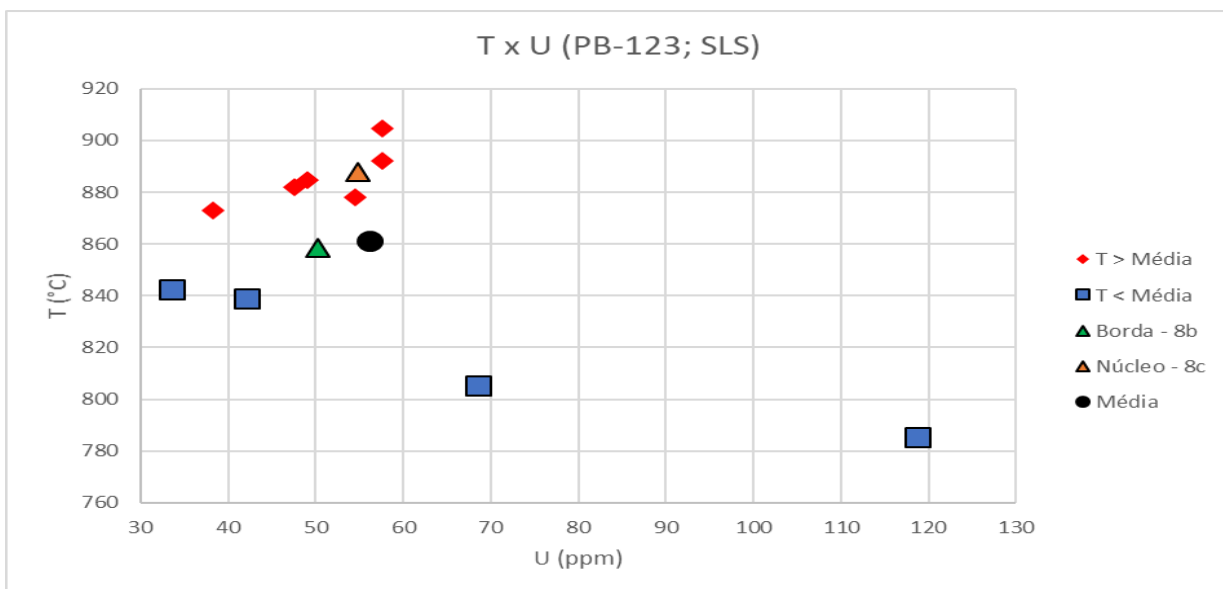


Figura 26: Correlação entre temperatura de cristalização (°C) e concentração de U (ppm) (PB-123; SLS)

Por fim, nota-se que em todos os diagramas apresentados, dois pontos sempre estão fora do padrão observado, estes pontos são os dois cristais analisados de menor temperatura, ZR-09 (785°C) à direita e ZR-02 (805°C) à esquerda, os dois cristais se mostram mais enriquecidos (em relação aos demais cristais de “T<Média”) em todos os elementos estudados, destacando-se o enriquecimento expressivo em urânio, apresentado, onde a concentração é quase três vezes superior aos demais cristais de “T<Média” e duas vezes superior aos cristais de “T>Média”.

O enriquecimento observado nos cristais de mais baixa temperatura pode ser fruto de uma cristalização tardia, a partir de um líquido residual enriquecido em elementos incompatíveis, visto que a principal característica destes cristais é o enriquecimento em elementos como ETR, urânio e tório.

Semelhante ao que foi observado com o estudo de zircão, temperaturas mais elevadas de cristalização de titanita registram ambientes de composição mais enriquecida, por exemplo em elementos como Háfio (Hf) e Nióbio (Nb). Nota-se, porém, que no caso da titanita, nem sempre variações de temperatura registram mudanças composicionais, como indicado nas figuras 27 a 43 apresentadas (semelhante ao que feito com a apresentação dos diagramas de zircão, os diagramas de titanita também serão apresentados em função da temperatura calculada, em vez da concentração de zircônio medida, com o objetivo de facilitar a interpretação dos dados apresentados, porém os resultados permanecem inalterados).

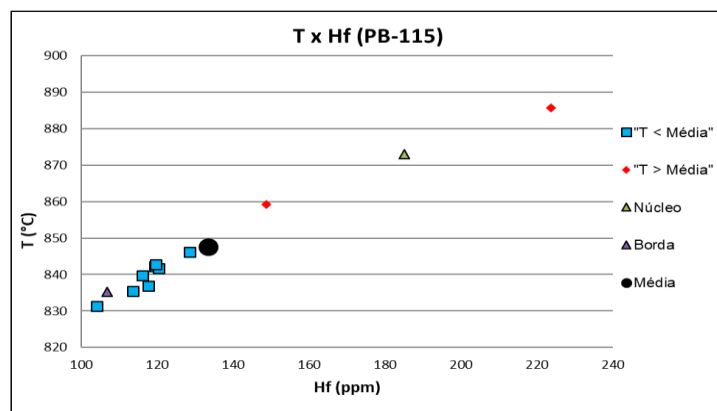
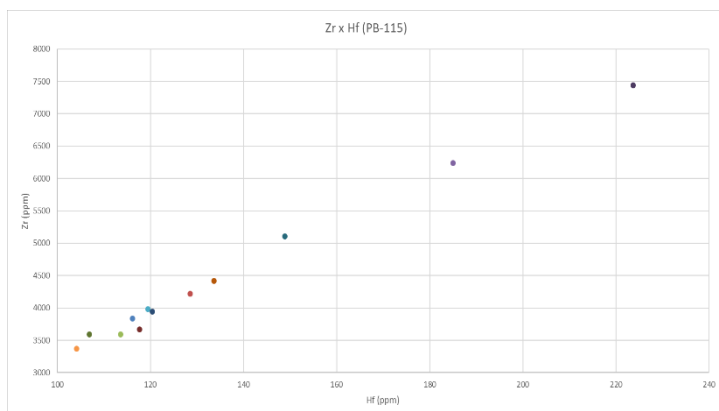
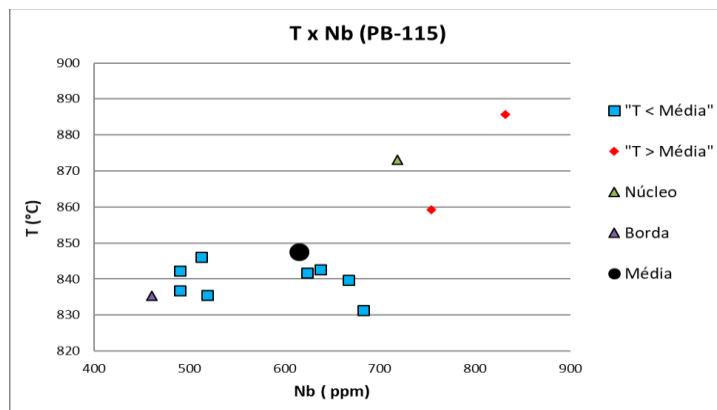
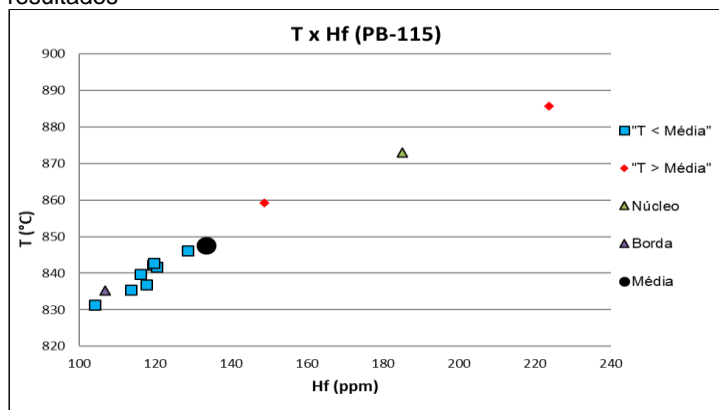
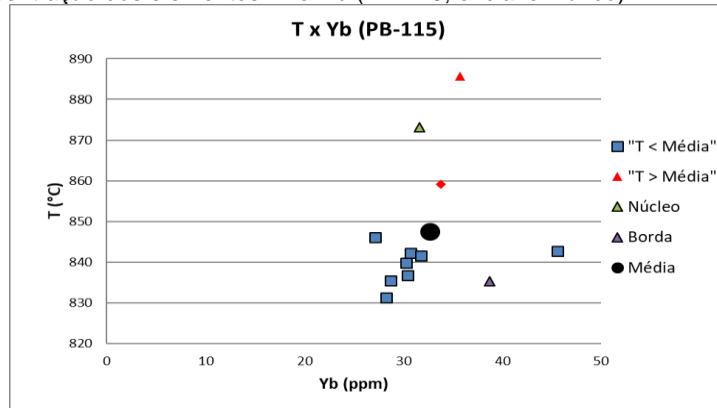
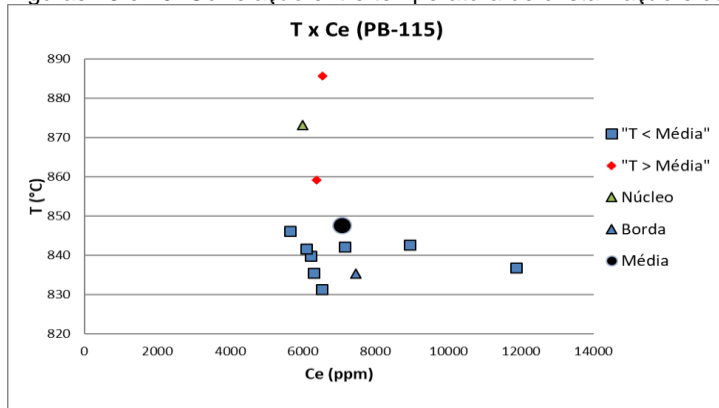


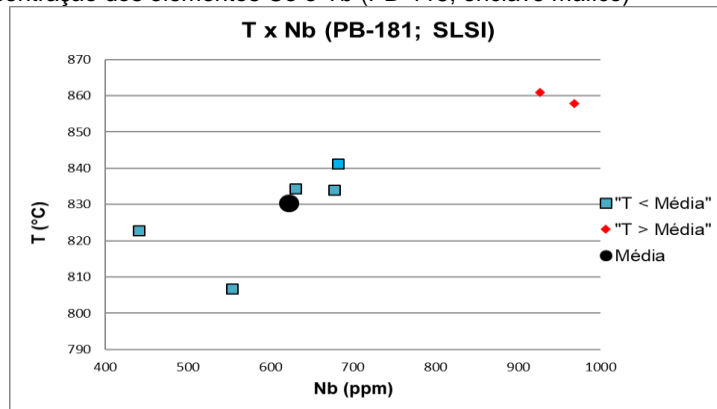
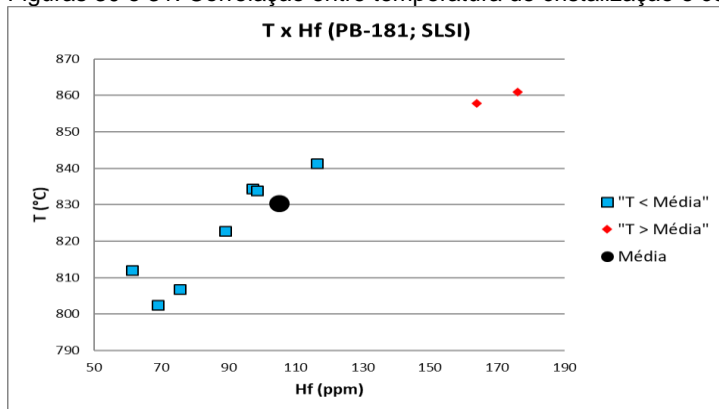
Figura 27: À esquerda [Zr] x [Hf] em cada amostra analisada, e à direita Temperatura x [Hf], indicando a semelhança na apresentação dos resultados



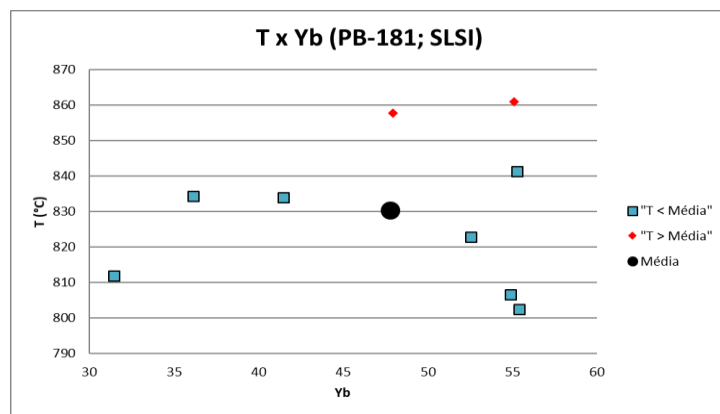
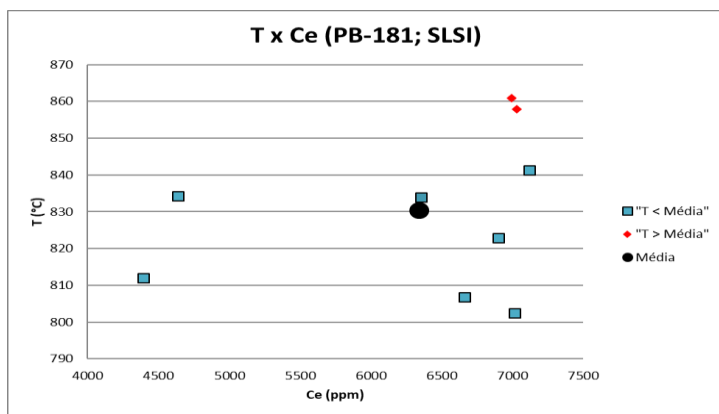
Figuras 28 e 29: Correlação entre temperatura de cristalização e concentração dos elementos Hf e Nb (PB-115; enclave máfico)



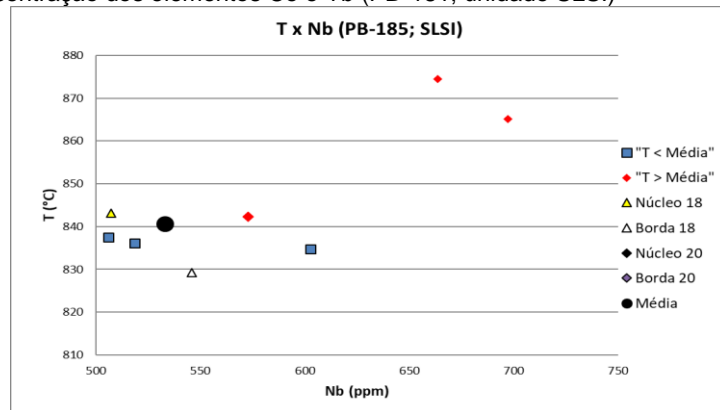
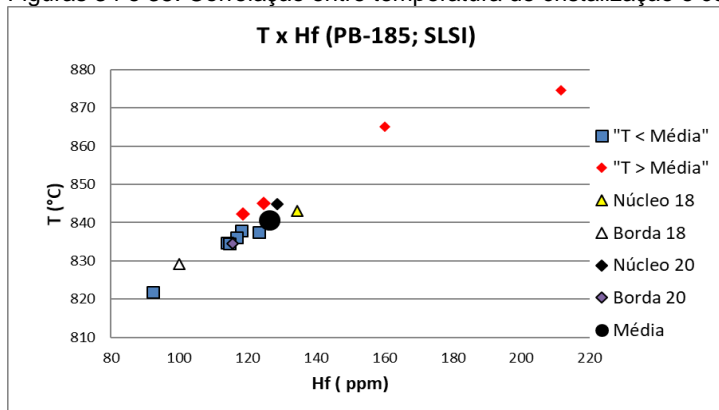
Figuras 30 e 31: Correlação entre temperatura de cristalização e concentração dos elementos Ce e Yb (PB-115; enclave máfico)



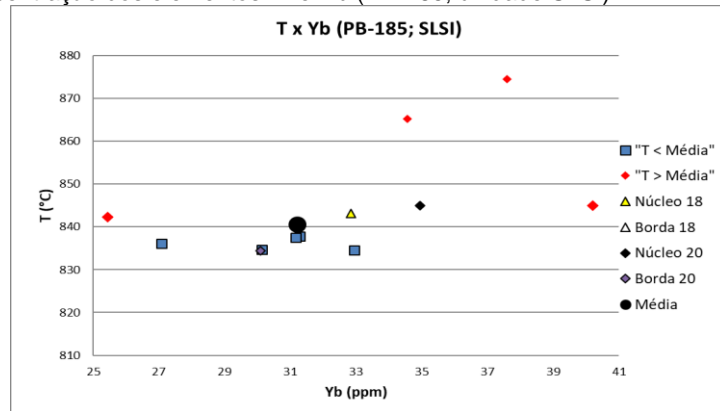
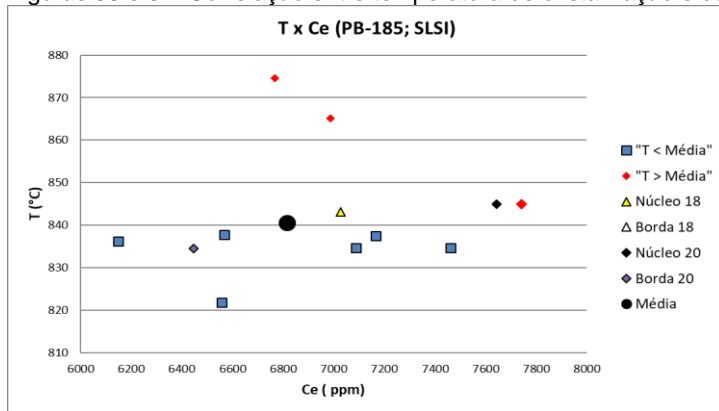
Figuras 32 e 33: Correlação entre temperatura de cristalização e concentração dos elementos Hf e Nb (PB-181; unidade SLSI)



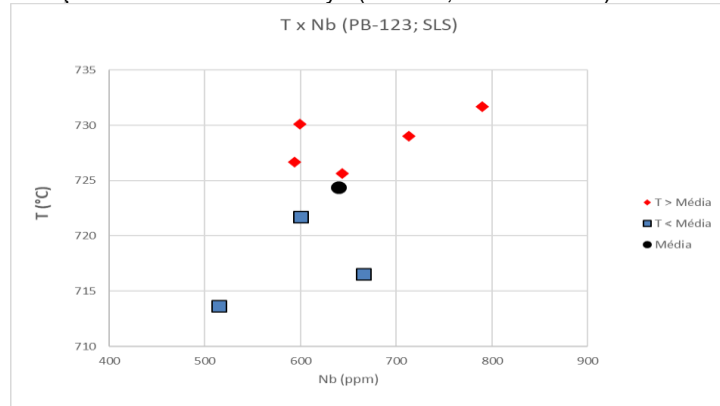
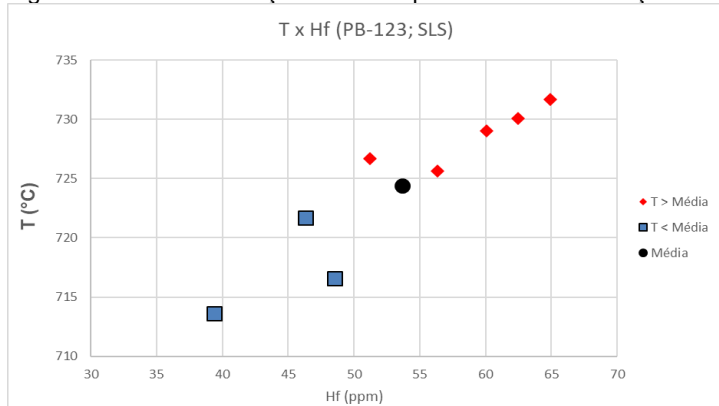
Figuras 34 e 35: Correlação entre temperatura de cristalização e concentração dos elementos Ce e Yb (PB-181; unidade SLSI)



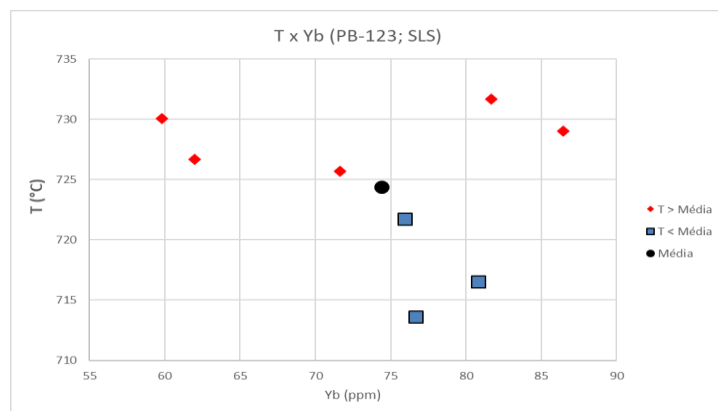
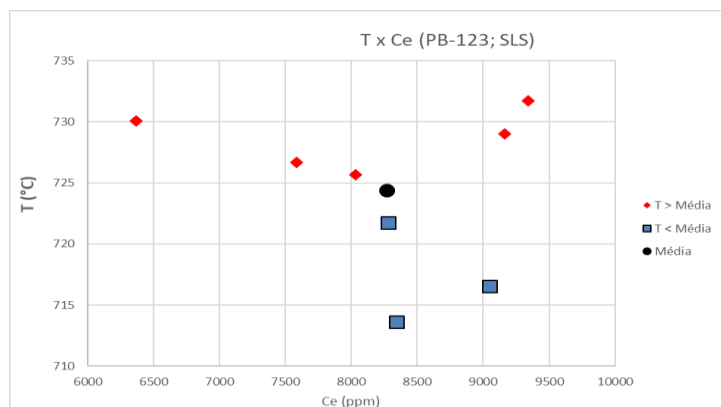
Figuras 36 e 37: Correlação entre temperatura de cristalização e concentração dos elementos Hf e Nb (PB-185; unidade SLSI)



Figuras 38 e 39: Correlação entre temperatura de cristalização e concentração dos elementos Ce e Yb (PB-185; unidade SLSI)



Figuras 40 e 41: Correlação entre temperatura de cristalização e concentração dos elementos Hf e Nb (PB-123; unidade SLSI)



Figuras 42 e 43: Correlação entre temperatura de cristalização e concentração dos elementos Ce e Yb (PB-123; unidade SLSI)

Nota-se que no caso do Háfnio, por exemplo, variações de temperatura de 50°C podem significar um aumento de até duas vezes na quantidade incorporada do elemento, enquanto que no caso dos elementos terras raras, como Cério (Ce) e Yttrio (Yb), não se observa correlação entre a concentração do elemento e variações de temperatura de cristalização.

Ao comparar a composição química entre as titanitas das duas unidades estudadas, notou-se que as titanitas da unidade SLS são mais enriquecidas em elementos terras raras, assim como urânio e tório, porém são mais empobrecidas em elementos como estrôncio, zircônio e háfnio, como indicado nas figuras 44 e 45:

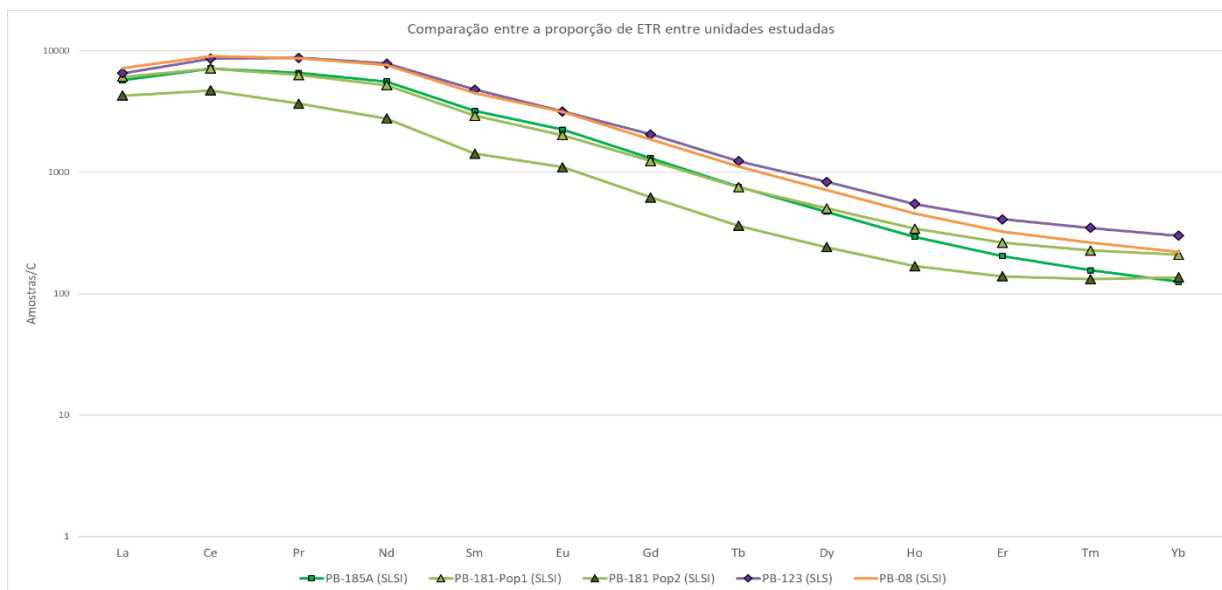


Figura 44: Comparação entre as unidades estudadas em relação à proporção de ETRs

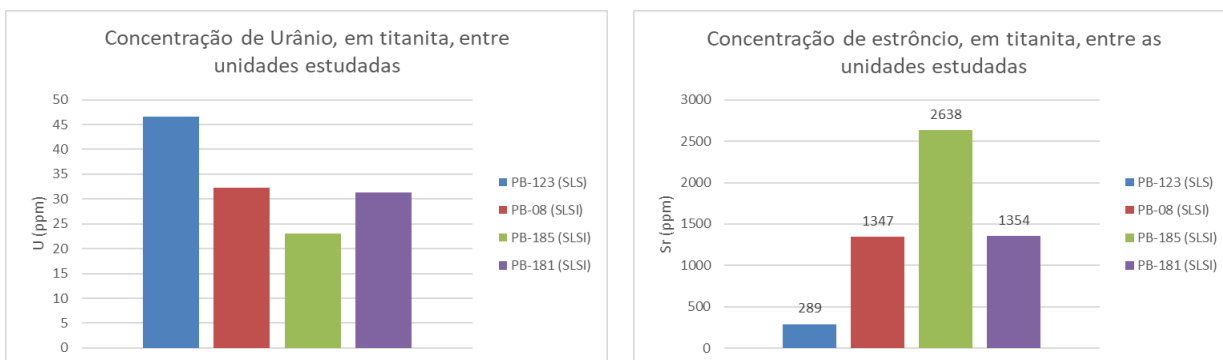


Figura 45: Comparação entre as unidades estudadas em relação à concentração de urânio.

O enriquecimento observado, de U, Th e ETRs, associado à temperaturas de cristalização mais baixas, da unidade supersaturada (SLS), além das características texturais típicas de cristalização em fase tardia, indicam que a titanita, na unidade SLS, pode ter sido cristalizada a partir de um líquido residual, enriquecido em elementos tipicamente incompatíveis (ETRs, U, Th, Pb), justificando o enriquecimento observado.

É importante ressaltar que os resultados de zircão da unidade SLS são concordantes com os resultados de titanita apresentados anteriormente, os zircões de mais baixa temperatura (ZR-02 e ZR-09) também registram enriquecimento significativo nos mesmos elementos citados acima, reforçando a hipótese de que tanto os zircões mencionados como as titanitas da unidade SLS foram cristalizados posteriormente, a partir de um líquido de composição diferenciada.

8.5 Integração dos Dados

Com base nos dados de temperatura de saturação em apatita ($T_{liquidus}$) e nas temperaturas de cristalização de zircão e titanita, é possível estabelecer a história de cristalização dos minerais acessórios que compõe as principais unidades do o plúton Pedra Branca.

A figura 46 indica que a cristalização dos minerais acessórios se deu início com a cristalização de apatita, seguida pela cristalização de zircão e titanita. O zircão apresenta temperatura média de cristalização semelhante para as duas unidades estudadas, de 861°C (SLSI) e 845 °C (SLS), registrando um intervalo de cristalização de, em média, ~44°C em ambas as unidades, enquanto que a titanita registra temperaturas médias de cristalização muito distintas entre as unidades SSI e SLSI, 827°C (SLSI) e 724°C (SLS), além de um intervalo de cristalização registrado de ~40°C, ou seja, na unidade insaturada provavelmente ocorreu a co-cristalização das duas fases minerais (titânio e zircão) enquanto que na unidade SLS a cristalização da titanita se deu início após grande parte da cristalização de zircão ocorrer.

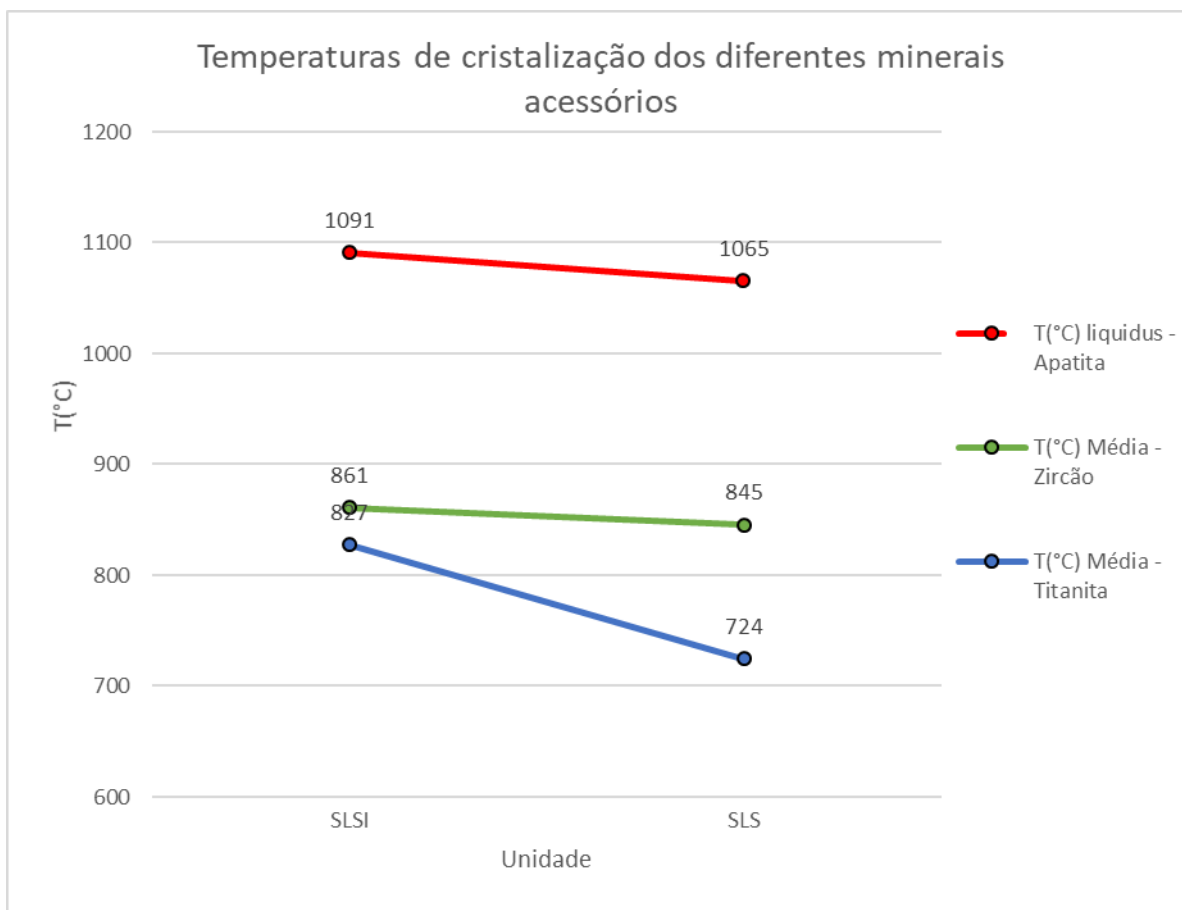


Figura 46: Temperaturas médias de cristalização dos diferentes minerais acessórios entre unidades

9 CONCLUSÃO

A partir do estudo da petrografia microscópica, conclui-se que as três unidades estudadas (SSI, SLS e SLSI) apresentam características mineralógicas distintas entre si que as definem, apesar de composições químicas semelhantes. Um resumo das principais paragêneses que caracterizam cada unidade está apresentado abaixo:

Unidade SSI	Unidade SLS	Unidade SLSI
K-fds+Cpx (Dp)+Opx(Ens)+Ap+ilm(±hem)	K-fds+Cpx (Dp)+Ap+ilm(±hem)±Tit	K-fds+Cpx sódico (Ea)+Ap+Tit+hem(±ilm)

Legenda: K-fds (Feldspato Alcalino), Dp (Diopsídio), Ens (Enstatita), ilm (Ilmenita), hem (Hematita), Ap (Apatita), Tit (Titanita), Ea (Egirina Augita).

Com base nas diferenças mineralógicas entre cada unidade, apontadas acima, e nos resultados apresentados, é possível concluir que: a unidade insaturada (SLSI) se cristalizou sob condições mais oxidantes quando comparada com as demais unidades (SSI e SLS), enquanto que a unidade supersaturada interna (SSI) se cristalizou sob condições mais redutoras, ou seja,

as condições de cristalização se tornam progressivamente mais redutoras de SLSI para SLS e SSI.

Assim como as condições de oxidação, as atividades de sílica e de titânio variam entre as unidades estudadas, enquanto que a atividade de titânio diminui entre a unidade externa (SLSI) e a central (SSI), o oposto ocorre com a atividade de sílica (do exterior para o centro, a atividade de sílica aumenta), esse efeito pode ser analisado a partir das diferenças texturais e químicas e entre titanitas de diferentes unidades, pela presença de quartzo em unidades centrais e de nefelina na unidade externa. Portanto conclui-se que; os pulsos magmáticos, que deram origem às diferentes unidades do plúton Pedra Branca, foram se tornando cada vez menos oxidados e mais enriquecidos em sílica, resultando em diferenças composicionais sutis entre cada pulso, gerando, por fim, as diferenças mineralógicas descritas.

Por fim, é possível concluir que os minerais acessórios podem fornecer informações tão precisas quanto os minerais principais em relação às condições de cristalização de rochas magmáticas e os métodos escolhidos (quando aplicados dentro de suas limitações) se mostraram muito eficientes e capazes de evidenciar as principais diferenças entre as unidades que compõem o Sienito Pedra Branca.

10 REFERÊNCIAS

- Bizzi, L, 2003. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Brasília: Serviço Geológico do Brasil, CPRM, Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Minas e Metalurgia, Parte II, cap. V, pág.292-294
- Carvalho, B.B, 2011. A origem da diversidade geoquímica do Sienito Pedra Branca (MG) a partir da evolução textural e da química de minerais. Dissertação de mestrado, IGc-USP, pg: 34-39; 53-61.
- Carvalho, B.B; Janasi V.A; 2012. Crystallization conditions and controls on trace element residence in the main minerals from the Pedra Branca Syenite, Brazil: An electron microprobe and LA-ICPMS study. *Lithos*, 153: 208-223.
- Carvalho, B.B; Janasi, V.A; Henrique-Pinto, R; 2014. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotope constraints on the petrogenesis of the K-rich Pedra Branca Syenite: Implications for the Neoproterozoic post-collisional magmatism in SE Brazil. *Lithos*, 205: 39-59.
- Deans, J.R, 2010. Trace elements and calculated temperature variation in quartz and titanite in the 36 Ma Harrison Pass pluton, Ruby Mountains, NE Nevada. Dissertação de mestrado, Texas Tech University, pg:35-36.
- Ferry, J.M; Watson, E.B, 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers, 154: 429-437.
- Hayden, L.A; Wark, D.A; Watson, E.B, 2007. A thermobarometer for sphene (titanite). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155: 529–540.
- Heilbron, M; Pedrosa-Soares, AC; Campos Neto, M.C; Silva, L.C; Janasi, V.A; 2004. A Província Mantiqueira. Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, São Paulo, Beca, pág. 203-234.
- Miles, A.J; Graham, C.M; Hawkesworth, C.J; Gillespie, M.R; Hinton, R.W; Bromiley, G.D; 2014. Apatite: A new redox proxy for silicic magmas? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 132: 101–119.

- Liu, Y.S; Hu, Z.C; Li, M; Gao, Shan; 2013. Applications of LA-ICP-MS in the elemental analyses of geological samples. *Chinese Science Bulletin*, vol 58, issue 32, 3863-3878.
- Sato, K; Tassinari, C.C.G.T; Basei, M.A.S; Siga Júnior, O; Onoe, A.T; de Souza, M.D; 2014. Sensitive high resolution ion microprobe (SHIMP Ile/MC) of the Instituto of Geoscience of University of São Paulo, Brazil: analytical method and first results. *Geologia USP, série científica*, 14(3), 3-18.
- Trail, D; Watson, E.B; Tailby, N.D; 2012. Ce and Eu anomalies in zircon as proxies for the oxidation state of magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 97: 70-87.
- Uhlein, A; Fonseca, M.A; Seer, H.J; Dardenne, M.A; 2012. Tectônica da faixa de dobramentos Brasília – Setores setentrional e meridional. *Geonomos*, 20(2), 1-14.
- Watson, E.B; Harrison, T.M; 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295-304.

ANEXO FOTOGRÁFICO - ANEXO I

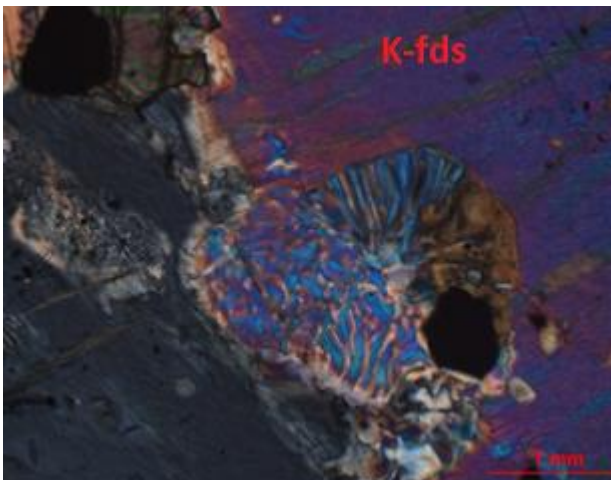


Foto 01: PB-09, mirmequita (textura de intercrescimento) em cristal de feldspato alcalino. (lâmina de 80micra, polarizadores cruzados, 10x).

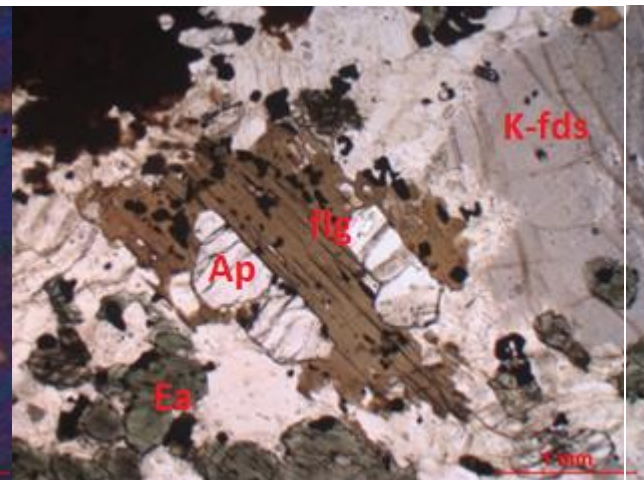


Foto 02: PB-09, cristais euédricos de apatita, com cristais intersticiais de flogopita e abundância de opacos (2,5x).

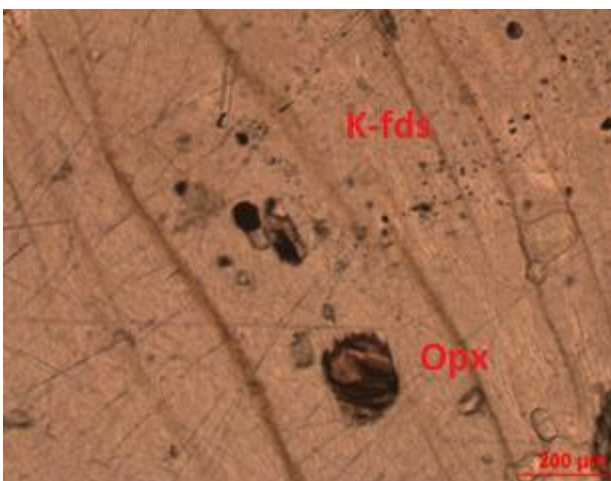


Foto 03: PB-59-02 pequenas inclusões de apatita, opacos e opx em k-feldspato (10x).

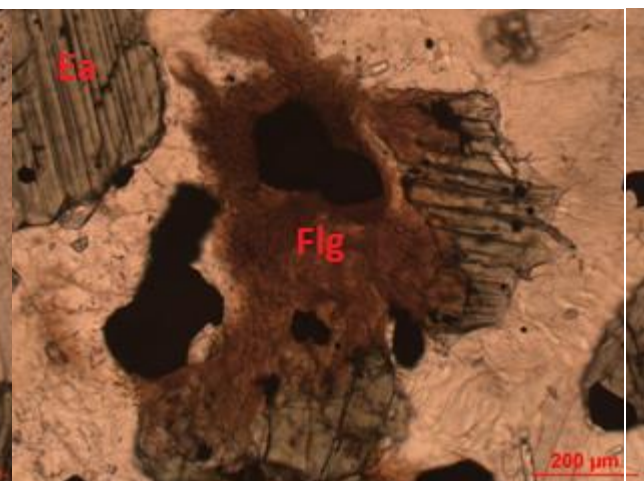


Foto 04: PB-59-02 flogopitas associadas a opacos e piroxênios (10x)

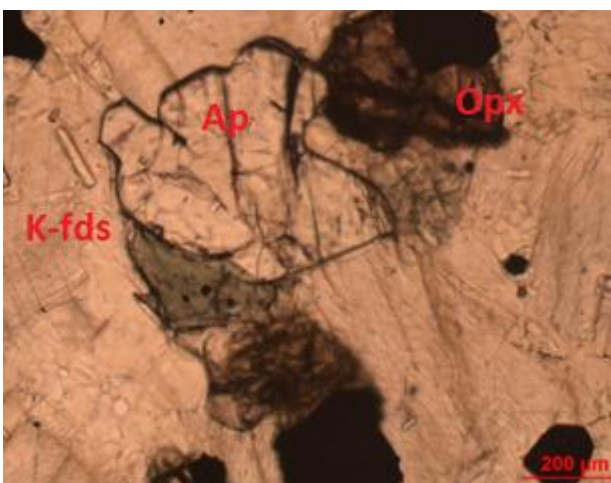


Foto 05: PB-59-01, apatita subédrica, opx e inclusões de finas apatitas em feldspato alcalino (5x).

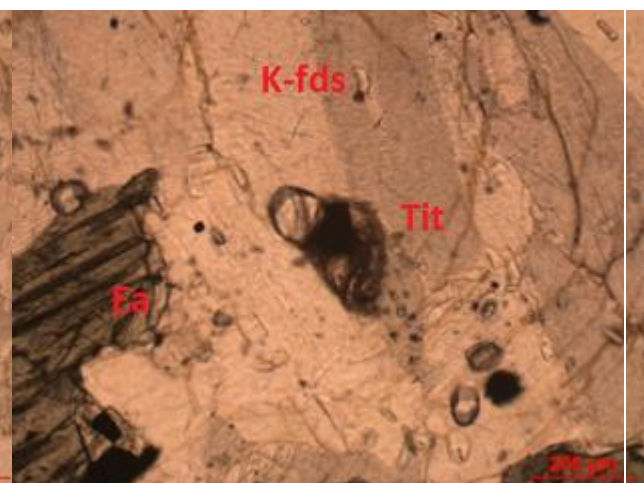


Foto 06: PB-59-01, titanita bordeando opaco, apatita e feldspato alcalino peritéticos (10x).

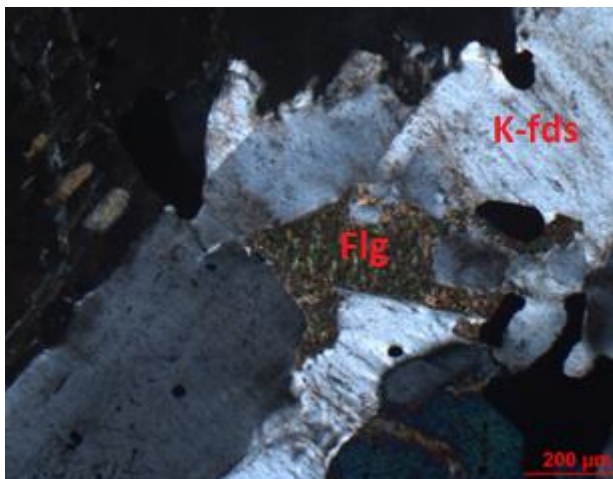


Foto 07: PB-123b, flogopita intersticial em meio a cristais de feldspato alcalino (Polarizadores cruzados, 10x).

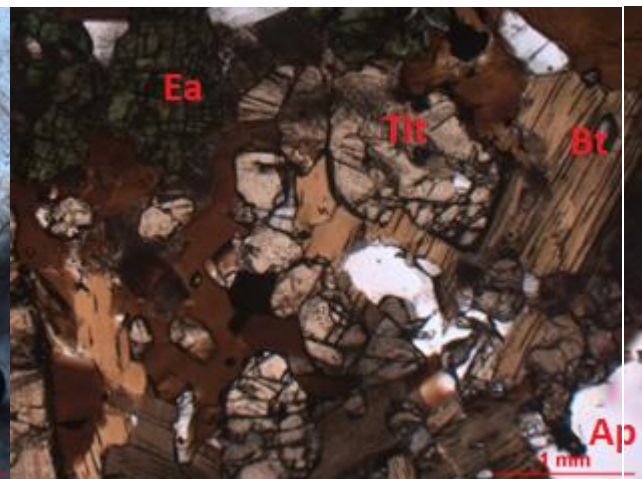


Foto 08: PB-115c, titanitas bem desenvolvidas, biotitas intersticiais e egrinas (5x).

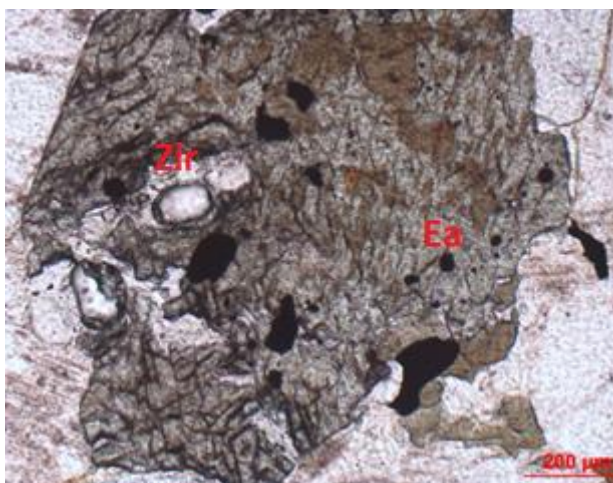


Foto 09: PB-123b, diopsídio com núcleos substituídos por flogopita, com inclusões de opacos e zircão. (10x).

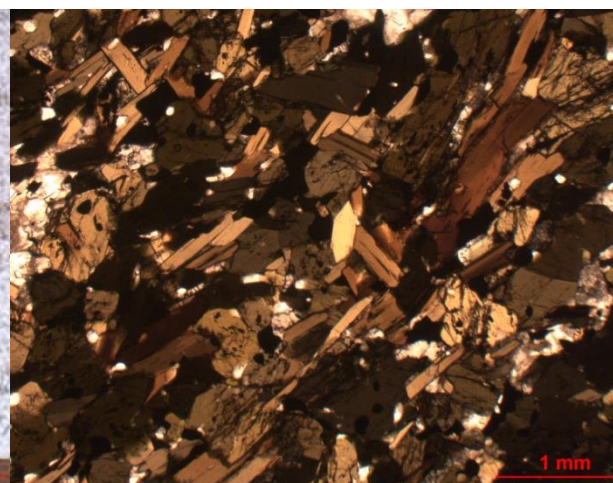


Foto 10: PB-170, aspecto geral do enclave máfico descrito (5x).

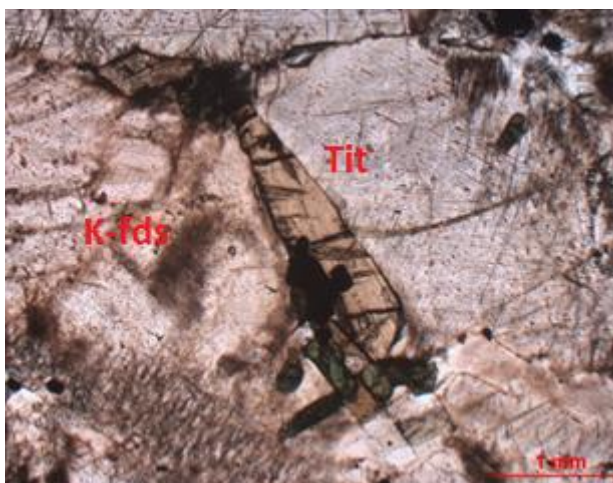


Foto 11: PB-185 A, titanita subédrica e cristais de feldspato alcalinos intensamente alterados com finas inclusões aciculares. (5x)

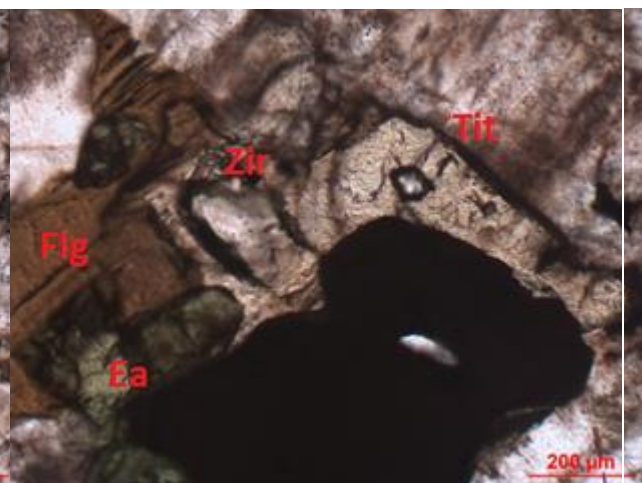


Foto 12: B-185 A, titanita anédrica associada a opaco, com inclusão de zircão. (10x).

TABELAS DE RESULTADOS DE QUÍMICA MINERAL – ANEXO II

Tabela de médias das concentrações de elementos traço entre cada unidade							
Element	PB-09 (SSI)	PB-115 (enclave)	PB-170 (enclave)	PB-181 A (SLSI)	PB-185 A (SLSI)	PB-123 (SLS)	Desv.P
Ba	0.14	765.59	155.32	497.63	482.79	0.27	312.5
Th	1090.31	3365.68	485.01	2882.52	4334.01	1793.06	1457.6
U	549.74	864.24	348.75	541.97	1229.80	711.38	309.3
La	6977.59	12454.58	2009.86	10086.13	12140.65	8733.76	3887.8
Nb	0.04	0.09	0.08	0.05	0.05	0.07	0.0
Ta	0.83	0.67	0.61	0.52	0.50	0.87	0.2
Ce	6673.02	9222.41	1813.21	7315.30	8843.55	6773.49	2652.9
Pr	5093.88	5926.57	1421.40	4582.69	5688.39	8914.39	2416.7
Sr	129.75	1683.46	177.77	1118.77	1990.05	183.17	833.8
Nd	3800.17	3895.99	1135.37	2974.47	3444.76	3050.15	1010.5
Zr	0.86	1.48	0.28	0.91	0.72	0.37	0.4
Hf	1.75	1.48	0.79	0.96	0.96	1.79	0.4
Sm	1766.71	1531.33	570.08	1135.15	1293.62	1259.38	405.7
Eu	816.91	909.27	375.95	714.61	816.82	726.71	185.9
Gd	784.83	728.81	309.15	526.09	593.35	588.44	167.4
Tb	411.98	340.45	172.50	243.98	264.23	286.63	82.4
Dy	256.40	196.39	113.58	144.44	148.68	171.90	49.9
Ho	179.07	134.15	84.51	103.79	101.49	120.60	33.3
Er	133.01	98.95	63.01	80.32	75.01	90.06	24.4
Tm	105.13	73.80	47.80	64.45	54.83	69.20	20.0
Yb	88.21	60.37	38.96	58.42	47.11	58.62	16.7
Lu	73.14	52.28	34.06	51.83	42.13	50.69	13.1

Tabela de elementos traço, em titanita, resultados completos, amostra PB-08										
Element	Tit_1	Tit_2	Tit_3	Tit_4	Tit_5c	Tit_5b	Tit_6	Tit_7	Tit_8	Média
Ba	0.155	0.082	3.43	0	0.115	0.137	0.227	0.08	0.172	0.488667
Th	5456.06	5636.08	5411.36	7364.55	5449.4	5366.57	6984.86	6551.37	6371.62	6065.763
U	2623.73	3705.41	3045.26	3386.71	1527.36	1497.44	3552.74	2575.99	1942.92	2650.84
Nb	1942.52	1479.97	2031.13	929.07	2143.67	1982.78	1852.25	1988.68	2138.62	1832.077
Ta	1709.18	874.17	1900.97	297.21	2479.19	2498.67	1334.67	1839.79	2167.27	1677.902
La	6902.81	6688.83	6859.08	7648.72	7679.98	7415.19	7023.37	7062.81	7468.76	7194.394
Ce	9059.38	8764.3	8822.99	9128.09	9705.6	9477.17	8553.36	8584.97	9326.82	9046.964
Pr	8380.65	8117.51	8378.62	8519.63	9626.72	9341.78	8087.82	8487.57	9022.71	8662.557
Sr	111.18	114.89	100.47	93.62	127.82	120.98	112.48	113.27	124.33	113.2267
Nd	7415.42	7051.18	7232.19	7332.47	8718.51	8518.4	7182.98	7477.88	7934.53	7651.507
Zr	967.59	873.27	911.02	839	949.93	875.54	1221.75	1106.95	1043.47	976.5022
Hf	882.5	689	812.17	616.99	907.94	891.99	1118.49	1057.95	979.86	884.0989
Sm	4294.32	4027.09	4122.96	4088.49	5332.89	5227.22	4214.54	4428.63	4734.36	4496.722
Eu	3060.24	2956.33	2929	2967.44	3572.53	3531.51	2895.39	3043.16	3216.91	3130.279
Gd	1784.69	1641.33	1667.95	1697.08	2239.78	2207.4	1775.69	1860.5	1969.72	1871.571
Tb	1039.54	967.9	978.52	1010.52	1345.92	1337.63	1040.87	1125.6	1179.73	1114.026
Dy	668.57	625.18	624.76	654.83	864.15	849.69	672.93	726.25	765.83	716.91
Ho	417.04	393.72	396.71	427.25	544.42	545.12	443.37	468.01	487.62	458.14
Er	288.99	278.29	281.54	310.23	380.71	381.87	316.43	329.74	349.54	324.1489
Tm	230.75	227.01	236.14	247.83	301.21	304.55	260.9	275.52	276.51	262.2689
Yb	192.43	200.77	197.41	221.87	243.26	247.05	229.67	232.01	226.15	221.18
Lu	120.71	122.55	130.33	147.15	154.56	153.01	143.44	147.74	145.28	140.53

PB-115(endave)		Tabela de elementos traço, em titanita, resultados completos, amostra PB-115																						
Element	Ti_1c	Ti_1b	Ti_2	Ti_3c	Ti_4	Ti_5	Ti_6c	Ti_7c	Ti_8	Ti_9	Ti_10	Ti_11b	Ti_12	Ti_13c	Ti_14	Ti_15	Ti_17c	Ti_7b	Ti_18	Ti_19	Ti_20	Média	Desv. P	
Ba	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	1.3	0.5	0.1	0.1	0.0	0.2	0.3	
Th	3040.4	2803.5	3282.6	3524.6	3200.0	2723.8	2507.6	3804.6	3582.3	3309.5	3122.8	3046.2	3025.0	3672.0	3400.6	3034.0	5130.0	4322.0	3396.4	3875.7	3533.8	3397.2	576.5	
U	999.7	1045.3	1120.5	2598.9	1156.4	927.4	875.7	1483.8	1263.6	1279.1	925.4	1408.2	1114.0	1201.9	1272.8	1404.4	3170.5	2487.8	1500.0	2080.5	1473.7	1466.2	611.0	
Nb	1729.1	1564.2	1779.1	1811.8	1869.2	1367.2	1383.9	1916.4	2079.4	1307.1	1820.5	1887.2	1663.2	1611.8	1751.9	1308.0	1701.3	1227.9	1012.1	2218.3	1765.2	1703.6	267.4	
Ta	1786.3	1623.6	1790.5	1689.4	1920.0	1340.6	1986.8	1888.3	2303.0	1774.4	1875.5	1809.7	1683.3	1858.4	1657.1	1615.2	1739.2	1063.2	1723.7	1685.9	1454.8	1708.6	240.6	
La	5399.1	5592.0	5677.1	5671.3	5330.4	5025.6	5402.2	5374.5	6440.8	6004.6	5646.2	5380.2	5886.1	6347.6	6206.2	10695.6	7630.5	6536.1	5475.1	5842.8	5749.1	6053.0	1207.3	
Ce	6266.1	6446.1	6492.1	6536.6	6281.4	5899.9	6596.1	6260.8	7094.5	7473.9	6813.7	6327.8	6375.5	7643.5	7248.7	12406.2	9947.8	7913.3	6664.2	6847.0	6608.6	7115.3	1428.8	
Pr	5754.4	5836.8	5978.6	5777.4	5633.0	5397.5	6049.2	5756.5	6040.5	7247.0	5912.6	5701.2	5788.4	7148.0	6655.8	6339.0	7383.3	6602.2	5898.7	6060.6	5941.8	6138.2	554.5	
Sr	238.2	246.6	250.9	234.1	216.1	263.4	267.7	219.5	300.8	236.9	247.3	222.3	229.3	257.1	225.7	377.2	216.6	176.0	229.7	203.8	229.2	242.3	40.1	
Nd	4820.8	4819.6	4887.7	4808.1	4653.3	4525.4	5196.0	4773.2	4948.2	6367.6	4788.9	4849.6	4757.5	6223.8	5676.7	5131.3	6044.0	5484.3	5056.4	5001.6	4934.7	5131.9	523.8	
Zr	718.3	711.0	692.8	799.7	738.9	761.9	648.9	1126.0	867.5	718.2	608.9	776.7	712.3	820.0	743.6	662.2	723.6	648.0	922.1	1342.9	819.0	788.7	169.6	
Hf	688.4	681.5	649.0	764.2	724.2	718.0	634.8	1033.5	913.5	667.4	582.0	728.6	672.6	780.4	717.8	657.5	668.0	597.1	831.6	1249.7	742.2	747.7	154.8	
Sm	2784.9	2804.3	2831.5	2703.5	2613.6	2564.9	3078.1	2711.1	2642.9	3836.8	2751.8	2771.7	2671.4	3625.9	3310.0	2991.2	2991.2	3495.5	3055.5	2857.9	2714.3	2738.2	2931.2	352.6
Eu	1956.1	1960.7	1976.0	1861.0	1810.2	1747.7	2184.0	1897.0	1842.6	2727.8	1995.7	1961.1	1880.1	2579.0	2328.2	2101.2	2393.5	2174.1	2017.4	1921.1	1899.1	2058.3	256.9	
Gd	1175.4	1198.3	1188.4	1163.9	1136.5	1064.8	1283.6	1199.7	1117.4	1588.4	1148.4	1169.0	1174.3	1536.1	1435.8	1284.9	1487.0	1285.2	1203.1	1172.5	1208.6	1248.6	143.2	
Tb	678.4	700.8	693.5	674.8	665.3	629.0	737.4	700.6	619.6	891.1	679.5	687.2	699.1	874.1	818.2	740.0	894.0	752.1	712.0	691.3	706.0	725.9	79.0	
Dy	431.0	444.4	433.5	426.8	427.3	405.4	468.5	450.2	383.3	547.2	420.6	437.1	448.5	558.9	510.1	461.6	568.6	482.2	458.1	442.1	460.3	460.3	48.8	
Ho	273.5	283.8	281.0	286.3	278.2	265.5	280.8	290.3	242.1	323.3	262.2	280.9	288.5	348.1	326.4	284.5	371.4	308.8	289.2	289.1	295.5	292.8	29.2	
Er	180.2	197.4	198.4	201.7	199.7	179.9	192.2	202.1	172.1	215.3	177.2	191.7	203.5	234.5	231.9	199.8	269.7	216.0	204.8	210.9	208.7	204.6	21.6	
Tm	149.6	148.2	151.9	155.5	154.7	137.5	142.0	162.6	129.0	154.6	140.5	148.0	161.1	181.9	178.1	155.6	222.4	176.2	161.0	165.4	165.4	159.1	19.7	
Yb	120.2	117.1	122.1	125.4	124.7	109.4	115.8	127.5	108.0	123.9	113.9	123.6	128.2	142.9	141.7	122.6	184.0	156.3	136.2	144.2	141.3	129.9	17.6	
Lu	75.8	74.6	77.6	86.8	80.7	73.4	71.7	85.6	69.6	79.8	68.8	80.8	81.4	91.5	91.4	82.9	118.4	105.5	84.9	89.4	93.2	84.0	11.9	

PB-185A (SLI)		Tabela de elementos traço, em titanita, resultados completos, amostra PB-185																					
Element	Ti_01	Ti_02	Ti_03	Ti_04	Ti_05c	Ti_05b	Ti_06	Ti_07	Ti_14	Ti_15.1	Ti_15.2	Ti_15.3	Ti_17	Ti_16	Ti_18c	Ti_18b	Ti_19	Ti_20c	Ti_20b	Média	Desv. P		
Ba137	0.15	0.52	1.25	0.21	0.11	0.11	0.33	2.65	0.06	0.15	0.20	2.31	0.14	0.13	0.08	5.63	0.18	0.49	0.82	1.42			
Th232	3082.56	2892.98	3033.45	3400.87	3259.38	4324.00	2621.40	3086.85	8445.19	3082.95	2286.83	8098.95	2923.29	3221.59	2388.45	2931.08	3499.99	3059.13	3646.61	1740.14			
U238	961.74	1820.50	946.33	969.02	2726.62	2210.97	1094.93	1208.10	4518.56	2504.29	1096.08	3896.91	1553.44	973.06	929.95	2041.08	955.58	1561.37	1776.03	1059.85			
Nb93	1591.77	1193.29	1515.06	1547.84	1364.98	1859.09	1382.66	1349.13	1769.40	1528.08	1298.60	1235.13	1607.10	1352.26	1455.64	1252.50	1315.45	1308.13	1440.34	184.09			
Ta181	1846.39	1571.42	1901.68	2142.40	1382.01	1597.23	1644.69	1702.64	1352.22	1297.88	1506.74	857.66	857.66	1543.38	1828.68	1412.44	1449.00	1788.28	1354.56	1565.52	287.69		
La139	5578.84	5459.17	6330.23	6236.64	5384.93	6130.12	5255.02	5871.23	6048.38	4858.13	5217.76	6917.88	5886.04	5783.45	4687.78	5626.58	6394.76	5300.07	5720.39	569.94			
Ce140	6634.13	6861.71	7524.50	7933.67	6760.04	7299.81	6426.19	7489.31	7070.69	6219.45	6852.00	8089.41	7797.35	7343.47	6146.37	6146.37	7406.70	7987.26	6736.20	7143.24	602.04		
Pr141	5941.76	6854.29	7000.30	7465.81	5843.84	6477.97	6067.07	7279.88	6180.80	5319.46	6596.01	7106.70	6904.32	7163.50	5351.58	6952.23	7860.43	6173.35	6585.52	714.25			
Sr88	258.28	216.04	267.92	248.76	178.25	250.56	260.67	191.73	210.95	232.68	232.68	181.38	179.63	255.46	232.43	217.71	255.59	240.05	240.05	240.05	710.41	146.96	
Nd143	4992.53	6173.23	6143.61	6518.38	4764.69	5414.25	5223.60	6391.69	5059.55	4258.60	5499.62	5877.44	5510.86	6385.43	4437.26	6001.31	6899.02	5309.22	5601.13	740.56			
Zr91	704.80	672.61	703.58	628.28	616.61	1005.76	655.85	669.32	1148.60	719.40	526.81	695.96	695.96	751.69	728.00	589.96	640.46	747.85	639.09	710.41	146.96		
Hf178	649.27	660.33	686.36	620.29	567.75	893.90	652.79	688.53	1182.81	662.82	515.96	549.62	587.44	5510.86	6385.43	4437.26	6001.31	6899.02	5309.22	5601.13	740.56		
Sm147	2690.19	3709.29	3475.96	3923.95	2709.03	3031.98	2933.49	3691.06	2772.53	3249.51	3147.28	3249.51	3026.53	3751.01	2427.23	3520.03	4165.49	3016.18	3199.32	521.07			
Eu151	1851.06	2581.59	2318.86	2664.35	1969.13	2087.22	2089.86	2616.15	1988.68	1760.85	2249.81	2217.00	2220.02	2553.67	1729.56	2473.90	2881.63	2072.22	2240.31	330.97			
Gd157	1145.75	1538.65	1434.47	1589.50	1107.59	1228.86	1241.94	1169.32	976.88	1223.67	1352.89	1197.08	1504.61	969.48	1416.60	1693.95	1211.78	1306.65	209.01				
Tb159	669.87	871.87	825.27	916.89	642.01	703.92	712.83	880.87	696.55	566.08	685.22	800.21	884.81	573.97	819.14	980.25	702.25	757.29	119.15				
Dy161	415.05	535.37	518.77	569.45	402.69	456.89	450.83	543.78	472.00	357.27	414.41	425.19	550.06	365.22	500.92	601.65	436.66	473.52	719.15				
Ho165	267.53	317.23	327.47	349.72	250.96	295.20	276.22	333.88	299.60	224.79	246.77	327.61	272.80	333.99	233.48	308.99	376.82	267.10	295.01	42.64			
Er166	181.97	214.39	217.82	235.56	181.75	207.00	186.84	227.71	209.36	157.40	176.03	238.12	193.73	232.57	161.13	203.32	253.12	192.75	204.25	27.24			
Tm169	135.37	160.17	168.57	170.62	138.82	139.06	166.23	174.00	123.15	126.16	148.32	172.76	118.83	162.99	185.02	149.33	155.61	21.95					
Yb173	107.76	126.17	124.73	134.76	119.59	139.40	109.25	125.64	151.56	102.60	98.71	162.14	121.55	132.44	98.72	132.84	140.87	121.36	125.01	17.56			
Lu175	65.75	82.39	80.00	82.80	78.85	90.46	66.53	81.45	106.44	68.44	63.25	115.16	79.91	84.56	61.53	84.57	87.68	76.89	80.93	13.93			

PB-181A (SLSI) Tabela de elementos traço, em titanita, resultados completos, amostra PB-181															
Element	Tit_01	Tit_03	Tit_04	Tit_05	Tit_09	Tit_11	Tit_15	Tit_16	Tit_2c	Média_Pop1	Média_Pop2	Desv. P			
Ba	0.20	0.29	54.17	0.65	0.33	0.24	0.51	85.72	0.08	20.25	0.22	31.70			
Th	2843.79	6758.69	6336.33	4848.21	4952.18	2449.40	8152.94	9064.50	6948.65	6723.07	2646.60	2244.64			
U	1511.30	3012.48	2753.96	1670.35	2754.60	1946.60	3089.09	3143.77	3204.90	2804.16	1728.95	669.34			
Nb	1680.99	1475.50	1175.88	974.63	1805.44	964.44	2471.14	2581.30	1819.31	1757.60	1322.72	589.03			
Ta	459.09	472.94	319.83	174.72	568.26	179.52	1638.20	1273.55	741.83	741.33	319.31	500.56			
La	4355.51	5917.44	6124.84	6007.18	5649.39	4217.90	6201.75	6437.59	6357.04	6099.32	4286.71	833.39			
Ce	4845.24	6959.53	7208.44	7327.87	6638.85	4592.58	7309.04	7345.61	7435.83	7175.02	4718.91	1111.83			
Pr	3863.40	6327.84	6441.97	6525.56	5691.45	3470.60	6518.72	6210.41	6601.91	6331.12	3667.00	1209.35			
Sr	112.85	114.10	111.35	95.44	112.66	109.42	116.53	136.22	115.34	114.52	111.14	10.47			
Nd	2981.76	5262.34	5498.55	5353.14	4606.93	2551.16	5445.71	4971.52	5423.73	5223.13	2766.46	1124.05			
Zr	637.84	415.53	535.17	388.42	634.38	451.17	944.95	904.15	708.38	647.28	544.51	201.75			
Hf	543.13	422.55	497.87	385.90	550.13	343.25	983.57	915.60	650.50	629.45	443.19	225.66			
Sm	1555.60	3011.20	3214.04	3115.17	2404.95	1292.15	3066.19	2630.21	3013.79	2922.22	1423.88	710.57			
Eu	1150.07	2085.88	2143.73	2165.41	1668.40	1054.47	2127.79	1869.45	2068.00	2018.38	1102.27	434.61			
Gd	686.51	1317.38	1343.54	1290.37	992.26	553.18	1300.18	1136.23	1316.20	1242.31	619.85	298.41			
Tb	397.21	796.47	782.68	794.85	596.28	327.85	808.76	693.18	797.65	752.84	362.53	186.13			
Dy	258.84	533.47	523.53	530.13	391.98	224.73	549.16	457.64	545.87	504.54	241.79	126.69			
Ho	183.88	362.28	351.99	348.91	267.90	153.62	382.07	315.99	373.24	343.20	168.75	84.48			
Er	152.50	275.01	267.28	266.71	206.12	124.91	295.38	248.42	283.23	263.16	138.71	60.78			
Tm	140.89	239.55	228.92	233.29	180.76	122.80	250.50	207.28	242.06	226.05	131.85	46.73			
Yb	145.64	221.35	211.84	223.34	167.14	126.80	222.23	193.40	222.89	208.88	136.22	37.28			
Lu	114.27	153.96	147.29	158.13	117.35	96.63	149.88	137.99	154.05	145.52	105.45	21.88			

PB-123 (SLS) Tabela de elementos traço, em titanita, resultados completos, amostra PB-123															
Element	Tit_1	Tit_2	Tit_3	Tit_4	Tit_5	Tit_6	Tit_7	Tit_8	Média	Desv. P					
Ba137	0.1	243.7	0.2	0.1	0.1	0.1	0.4	0.1	0.2	86.1					
Th232	7842.6	6558.9	6602.8	4933.4	5932.1	6978.3	6240.2	7192.4	6535.1	875.0					
U238	4140.3	3582.1	3741.6	3399.5	3651.7	3679.3	4540.2	3806.1	3817.6	360.4					
Nb93	1902.3	1371.7	1600.1	1583.0	1716.2	2106.0	1598.5	1775.0	1706.6	224.6					
Ta181	1498.5	624.3	904.3	1077.2	1479.0	2324.4	1208.4	1329.9	1305.7	506.1					
La139	7169.5	6905.9	6552.8	6024.8	6382.9	6984.3	5495.5	6943.2	6557.3	569.3					
Ce140	9574.9	8717.9	8654.0	7924.2	8395.6	9760.6	6657.5	9453.0	8642.2	1021.1					
Pr141	9885.0	9077.4	8693.3	7849.3	8393.5	10325.1	6130.9	9918.2	8784.1	1364.5					
Sr88	25.1	21.4	23.0	25.3	24.9	27.1	23.3	24.2	24.3	1.7					
Nd143	9364.5	7630.9	7659.0	6942.0	7580.6	9688.5	5106.4	9100.1	7884.0	1499.3					
Zr91	252.9	191.8	222.0	242.5	238.2	265.0	257.6	202.2	234.0	26.4					
Hf178	335.6	220.0	258.8	286.1	314.8	362.7	349.1	271.0	299.8	49.2					
Sm147	5903.9	4673.9	4532.6	4066.6	4658.1	6077.0	2790.2	5753.5	4807.0	1098.2					
Eu151	3508.0	3591.1	3549.6	2827.0	3168.0	3290.4	1965.9	3485.7	3173.2	550.0					
Gd157	2507.1	1892.9	2036.5	1708.7	1990.0	2618.5	1173.6	2452.2	2047.4	479.1					
Tb159	1515.9	1150.8	1241.3	1014.4	1200.8	1584.1	714.0	1463.8	1235.6	288.2					
Dy161	1029.4	802.3	823.7	663.7	795.8	1071.2	500.7	983.4	833.8	192.5					
Ho165	673.3	527.8	548.5	453.0	524.3	685.3	343.8	636.5	549.0	115.9					
Er166	502.5	403.0	403.3	338.8	396.1	494.7	273.3	463.7	409.4	78.1					
Tm169	418.4	342.5	352.1	289.3	346.8	408.6	241.9	390.3	348.7	59.9					
Yb173	348.7	309.2	306.2	250.0	288.8	329.4	241.1	325.8	299.9	38.0					
Lu175	253.9	219.2	221.7	195.8	220.4	232.8	193.2	233.5	221.3	19.9					

PB-181 Tabela de ETR, em zircão, resultados completos			
Element	ZR-06c	ZR-06b	PB-181 Média (SLSI)
La	0.609	0.186	0.3975
Ce	37.52	29.9	33.71
Pr	5.91	1.64	3.775
Nd	13.17	3.39	8.28
Sm	38.25	12.69	25.47
Eu	52.44	16.82	34.63
Gd	66.62	22.76	44.69
Tb	80.31	32.55	56.43
Dy	106.17	42.5	74.335
Ho	140.14	58.18	99.16
Er	187.52	81.79	134.655
Tm	285.64	127.92	206.78
Yb	416.78	188.45	302.615

PB-123b (SSI)		Tabela de ETR, em zircão, resultados completos												
Element	ZR-01	ZR-02	ZR-03	ZR-04	ZR-05	ZR-06	ZR-07	ZR-08b	ZR-08c	ZR-09	ZR-10	ZR-11	Média	Desv P.
La	0.312	0.71	0.94	0.178	1.2	0.39	0	1.41	0.56	0	0.35	0	0.504167	0.48
Ce	48.13	33.42	47.73	36.63	48.27	51.68	29.54	33.12	41.97	34.71	47.19	27.8	40.01583	8.39
Pr	7.93	1.25	9.71	2.56	12.84	12.13	0.67	2.55	7.58	1.29	8	1.01	5.626667	4.56
Nd	21.91	2.79	24.87	8.06	29.25	28.53	1.64	3.46	17.57	3.47	20.75	2.72	13.75167	11.06
Sm	79.8	14.04	72.32	39.33	89.17	90.44	10.24	15.92	59.63	24.2	55.29	12.6	46.915	31.30
Eu	81.53	19.58	68.63	36.48	77.03	82.34	12.82	19.35	57.09	28.89	64.67	13.95	46.86333	27.70
Gd	153.93	44.18	132.65	74.33	157.97	155.48	28.08	35.68	122.2	70.94	111.92	27.64	92.91667	51.88
Tb	180.27	65.92	159.83	94.61	185.31	198.92	35.25	57.39	152.45	95.18	136.46	36.3	116.4908	59.68
Dy	232.93	84.42	193.39	110.33	228.35	225.46	47.93	67.65	182.85	127.87	160.01	48.57	142.48	70.68
Ho	256.86	122.78	250.27	150.56	284.47	279.61	70.59	91.43	243.25	168.53	203.32	68.38	182.5042	81.29
Er	335.56	166.81	302.44	191.53	347.12	336.04	99.64	132	280.88	237.02	247.78	90.68	230.625	93.31
Tm	419.18	223.42	394.01	256.27	445.35	425.55	134.65	167.46	381.09	322.25	324.4	132.12	302.1458	116.15
Yb	534.18	291.1	477.13	324.8	543.37	539.93	192.91	241	465.93	430.66	427.27	173.32	386.8	136.55

TABELAS DE CÁLCULO DAS RAZÕES (Ce/Ce*) e (Eu/Eu*) – ANEXO III

Cálculo das razões (Ce/Ce*) e (Eu/Eu*) amostra PB-59-01																			
Element	AP01a	AP01b	AP01c	AP01d	AP01e	AP01f	AP01g	AP01h	AP01i	AP01j	AP01k	AP01l	AP01m	AP01n	AP01o	AP01p	AP01q	AP01r	Média
La19	613.73	6404.59	7027.95	6887.71	6887.71	6887.71	6887.71	6887.71	6887.71	6887.71	6887.71	6887.71	6887.71	6887.71	6887.71	6887.71	6887.71	6887.71	6887.71
Ce40	7026.75	5914.05	6154.12	6518.42	7471.75	6281.32	7028.86	6826.52	6414.34	6826.52	6826.52	6826.52	6826.52	6826.52	6826.52	6826.52	6826.52	6826.52	6826.52
Pr141	5955.06	4787.44	5041.97	4995.05	5812.62	5035.63	5722.86	4825.84	4444.53	4936.43	4936.43	4936.43	4936.43	4936.43	4936.43	4936.43	4936.43	4936.43	4936.43
Ce*	5591.24	5537.29	5932.71	5488.30	6373.14	5600.13	6233.39	5585.40	5393.34	5870.07	5539.39	5134.75	5386.23	5861.36	5861.36	5861.36	5861.36	5861.36	5861.36
Ce/Ce*	1.26	1.07	1.03	1.19	1.17	1.12	1.11	1.22	1.19	1.18	1.16	1.15	1.13	1.12	1.19	1.15	1.18	1.16	1.16
Sm147	1642.41	1880.5	1982.44	1781.41	2069.43	1831.75	2147.54	1184.31	1057.23	1095.24	1815.94	1700.05	1770.49	2047.8	1881.04	1827.93	1673.34	1436.26	1697.54
Eu51	685.59	759.81	779.79	764.34	867.07	769.32	865.82	444.89	399.7	424.48	700.65	658.5	688.5	790.19	770.34	745.19	694.64	718.22	684.74
Gd157	814.21	921.33	988.71	876.86	1019.68	878.85	1019.38	576.61	524.86	547.13	874.02	810.99	851.85	1006.78	965.84	895.62	809.42	850.78	827.90
Eu*	1156.40	1316.27	1407.08	1240.82	1452.64	1275.70	1479.58	826.37	744.91	774.11	1259.83	1174.19	1228.78	1435.86	1305.34	1275.50	1163.80	1208.06	1185.45
Eu/Eu*	0.60	0.58	0.55	0.61	0.60	0.60	0.57	0.54	0.54	0.55	0.56	0.56	0.56	0.55	0.59	0.58	0.60	0.59	0.58
Cálculo das razões (Ce/Ce*) e (Eu/Eu*) amostra PB-170																			
Element	AP01c	AP01d	AP01e	AP01f	AP01g	AP01h	AP01i	AP01j	AP01k	AP01l	AP01m	AP01n	AP01o	AP01p	AP01q	AP01r	AP01s	AP01t	Média
La	2193.87	1240.75	2142.43	1957.14	1950.35	2327.67	2072.44	1878.83	2188.42	1800.77	2136.01	2453.49	1785.99	2009.86	1813.21	1421.40	1688.79	1500.19	1688.79
Ce	1871.64	1330.05	1939.61	1788.12	1784.55	2109.79	1860.82	1675.57	2143.52	1569.8	1958.28	1971.91	1568.1	1813.21	1421.40	1688.79	1500.19	1688.79	1500.19
Pr	1486.94	1189.28	1511.13	1375.2	1432.37	1639.37	1436.45	1332.25	1584.23	1217.29	1452.5	1561.09	1260.13	1421.40	1688.79	1500.19	1688.79	1500.19	1688.79
Ce*	1806.14	1214.74	1799.30	1640.57	1671.41	1953.44	1725.39	1582.11	1861.98	1480.56	1761.41	1957.07	1500.19	1688.79	1500.19	1688.79	1500.19	1688.79	1500.19
Ce/Ce*	1.04	1.09	1.08	1.09	1.07	1.08	1.08	1.06	1.15	1.06	1.11	1.01	1.05	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
Sm	584.97	589.5	599.04	536.79	543.35	624.48	546.06	530.95	587.71	485.92	575.05	673.43	533.83	570.08	419.80	399.15	392.60	419.80	399.15
Eu	375.09	394.6	384.6	363.85	375.14	422.78	363.62	367.16	399.87	308.46	374.18	425.4	332.62	375.95	309.15	309.15	309.15	309.15	309.15
Gd	315.31	329.5	332.32	292.03	286.36	336.4	295.07	282.92	317.93	262.18	310.63	369.51	288.74	309.15	309.15	309.15	309.15	309.15	309.15
Eu*	429.47	440.73	446.18	395.93	394.45	458.34	401.40	387.58	432.26	356.93	422.64	498.84	392.60	419.80	419.80	419.80	419.80	419.80	419.80
Eu/Eu*	0.87	0.90	0.86	0.92	0.95	0.92	0.91	0.95	0.93	0.86	0.89	0.85	0.85	0.90	0.90	0.90	0.85	0.85	0.90
Cálculo das razões (Ce/Ce*) e (Eu/Eu*) amostra PB-115																			
Element	AP01a	AP01b	AP01c	AP01d	AP01e	AP01f	AP01g	AP01h	AP01i	AP01j	AP01k	AP01l	AP01m	AP01n	AP01o	AP01p	AP01q	AP01r	Média
La	10814.4	12424.94	11332.07	11956.97	11638.58	11899.08	13388.72	13542.01	15568.95	12127.11	10295.71	11744.22	15513.07	11310.57	13191.14	12393.13	12667.28	12798.45	11693.38
Ce	6995.52	8491.43	7740.06	8263.26	8151.27	8105.43	10449.21	10841.33	10831.6	9382.84	7829.08	8882.21	10754.72	8833.77	10530.35	10616.74	9880.88	9751.03	8713.68
Pr	4274.13	5055.21	4599.14	4956.49	4832.22	4983.32	6888.22	7226.9	7030.28	6133.52	5021.36	5663.23	6782.26	5339.94	6765.07	6722.95	6333.38	6361.12	6146.98
Ce*	6796.69	7556.61	7219.26	7711.22	7499.67	7700.45	9630.32	9892.76	10462.03	8624.49	7190.16	8144.96	10057.37	8121.04	9446.64	9323.61	8833.37	9092.27	8869.01
Ce/Ce*	1.03	1.07	1.07	1.07	1.09	1.06	1.09	1.04	1.04	1.09	1.09	1.09	1.05	1.09	1.11	1.08	1.08	1.08	1.08
Sm	937.9	1114.66	1053.32	1123.26	1091.54	1117.29	1697.41	1767.43	1935.54	1584.36	1288.38	1495.36	1616.15	1539.12	1782.59	1736.92	1745.41	1782.74	1561.87
Eu	599.61	683.75	637.3	675.06	675.21	673.12	1055.94	1125.95	1065.16	936.77	739.93	876.81	938.07	944.65	1079.74	1043.62	1041.36	1069.86	899.25
Gd	466.65	563.94	510.83	549.4	537.19	544.65	894.98	846.78	916.38	751.69	620.71	706.82	777.71	721.24	835.78	826.15	803.3	837.08	686
Eu*	661.57	792.84	733.53	785.57	765.74	780.08	1168.92	1224.81	1331.80	1091.31	894.27	1028.08	1211.11	1053.60	1220.60	1197.90	1187.78	1213.34	991.06
Eu/Eu*	0.86	0.86	0.87	0.86	0.88	0.86	0.90	0.92	0.80	0.86	0.83	0.85	0.83	0.90	0.88	0.87	0.88	0.88	0.91

Cálculo das razões (Ce/Ce*) e (Eu/Eu*), amostra PB-09																			
Element	AP01a	AP01b	AP01c	AP01d	AP02a_spot	AP02b_spot	AP03a	AP03b	AP03c	AP04a	AP04b	AP04c	AP04d	AP05a	AP05b	AP05c	AP05d	AP06a	AP06b
La	6463.14	6849.97	6485.72	6672.59	8956.25	7161.97	7591.06	7700.23	7370.47	5322.41	5531.26	6250.43	5384.28	7636.65	7465.97	7513.87	7879.93	6140.44	6244.89
Ce	6092.77	6612.78	6282.90	6329.69	8034.10	6672.32	7015.48	6936.50	6753.27	5036.90	5303.70	6161.85	5282.19	6959.92	7048.17	6893.11	7357.47	6798.60	6818.62
Pr	4929.97	5206.07	5036.95	4938.61	4476.62	4750.59	5492.35	5498.21	5318.37	4018.98	4195.00	4798.16	4049.08	5504.73	5434.97	5529.89	5847.75	4895.65	5071.44
Ce*	5647.36	5971.72	5715.61	5741.08	8331.96	5822.97	6465.99	6566.73	6260.90	4625.00	4811.27	5476.36	4669.19	6483.65	6382.82	6446.00	6792.28	5482.83	5597.62
Ce/Ce*	1.08	1.11	1.10	1.10	1.27	1.14	1.09	1.07	1.08	1.09	1.10	1.13	1.13	1.07	1.10	1.07	1.08	1.24	1.22
Sm	1720.59	1804.46	1723.24	1725.47	1424.08	1366.65	1852.32	1942.37	1881.11	1393.10	1461.86	1706.09	1388.49	2090.48	1991.64	2024.48	2161.04	1506.79	1564.17
Eu	794.15	805.86	755.59	783.98	645.75	640.37	902.24	933.51	895.87	651.94	676.27	795.74	644.40	911.39	897.08	912.57	980.85	769.76	793.90
Gd	783.23	822.44	779.57	773.83	633.06	597.84	833.65	866.74	820.10	615.64	662.89	743.42	616.56	988.29	896.13	908.80	972.59	654.99	681.40
Eu*	1160.87	1218.22	1159.05	1155.52	949.49	903.90	1243.65	1297.51	1242.05	906.09	984.40	1126.21	925.25	1400.53	1335.95	1356.41	1449.76	993.44	1032.39
Eu/Eu*	0.65	0.66	0.65	0.68	0.68	0.71	0.73	0.72	0.72	0.70	0.69	0.71	0.70	0.67	0.67	0.67	0.68	0.77	0.77
Cálculo das razões (Ce/Ce*) e (Eu/Eu*), amostra PB-181																			
Element	AP01a	AP01b	AP02a	AP02b	AP03a	AP03b	AP04a	AP04b	AP05a_spot	AP06a_spot	AP07a	AP07b	AP08a_spot	AP09a	AP09b	AP10a_spot	Média		
La	9712.89	10195.25	10150.86	10802.54	11256.30	13599.36	11745.15	9316.47	9466.50	9144.74	11137.03	10055.52	8239.25	8365.97	8461.30	9467.67	10069.80		
Ce	8064.69	8110.30	8133.66	7742.48	7828.76	7340.54	8150.93	6426.06	7396.88	6164.96	7962.77	7096.80	6934.62	8199.50	7495.61	6754.61	7487.70		
Pr	5012.03	5006.79	4448.46	4564.54	4681.73	4365.59	5217.25	4093.10	4765.61	3788.41	4752.67	4353.05	4617.85	5561.56	5112.31	4716.98	4691.12		
Ce*	6977.20	7144.61	6719.80	7022.01	7259.40	7705.14	7827.99	6175.21	6716.67	5885.92	7275.34	6616.05	6168.28	6821.13	6576.99	6682.72	6848.40		
Ce/Ce*	1.16	1.14	1.21	1.10	1.08	0.95	1.04	1.04	1.10	1.05	1.09	1.07	1.12	1.20	1.14	1.01	1.09		
Sm	1261.14	1256.61	964.72	1002.17	1083.56	967.02	1357.30	1057.82	1266.24	867.18	1069.61	917.66	1361.94	1583.78	1438.78	1353.40	1175.56		
Eu	743.62	725.98	611.90	618.90	662.20	587.20	832.99	641.79	774.23	537.76	657.73	563.27	813.85	1076.97	933.70	822.62	725.29		
Gd	604.67	573.12	463.19	469.81	522.84	458.12	630.91	489.34	598.47	399.07	506.09	428.91	617.19	707.93	641.55	619.12	545.65		
Eu*	873.25	848.64	668.47	686.17	752.68	665.59	925.38	719.47	870.52	588.27	735.74	627.37	916.83	1058.87	960.75	915.38	800.84		
Eu/Eu*	0.85	0.86	0.92	0.90	0.88	0.88	0.90	0.89	0.89	0.91	0.89	0.90	0.89	1.02	0.97	0.90	0.90		
Cálculo das razões (Ce/Ce*) e (Eu/Eu*), amostra PB-185																			
Element	AP01a_spot	AP01b_spot	AP02a_spot	AP02b_spot	AP03a	AP03b	AP04a	AP04b	AP05a	AP05b	AP06a_spot	AP06b_spot	AP07a	AP07b	Média				
La	14574.17	15103.93	13274.69	12744.64	13487.60	12081.82	10609.56	11009.71	11906.36	12933.77	10420.86	10540.10	10293.05	10988.80	12140.65				
Ce	10884.10	9921.23	9452.66	8908.63	11085.29	9909.40	7626.73	8011.97	9019.22	9348.55	7212.55	7474.04	7340.86	7614.40	8843.55				
Pr	7112.82	6183.09	6277.72	6147.20	7236.37	6493.94	5051.46	5253.95	5716.00	6149.13	4213.10	4434.51	4648.03	4720.09	5688.39				
Ce*	10181.52	9663.80	9128.79	8851.21	9879.34	8857.69	7320.78	7605.55	8249.65	8918.04	6626.02	6836.68	6916.82	7201.95	8302.70				
Ce/Ce*	1.07	1.03	1.04	1.01	1.12	1.12	1.04	1.05	1.09	1.05	1.09	1.09	1.06	1.06	1.07				
Sm	1646.71	1380.68	711.21	1063.47	1910.05	1683.24	1294.54	1355.33	1433.82	1565.41	943.85	980.73	1022.59	1119.04	1293.62				
Eu	1081.24	905.37	468.72	686.14	1191.35	1054.25	800.56	820.47	867.21	937.46	601.72	642.82	653.50	724.66	816.82				
Gd	763.44	656.21	337.30	487.80	853.79	743.63	589.71	613.22	661.60	726.98	437.34	461.55	462.20	512.08	593.35				
Eu*	1121.23	951.85	489.79	720.25	1277.02	1118.80	873.73	911.66	973.97	1066.78	642.48	672.80	687.49	756.99	876.06				
Eu/Eu*	0.96	0.95	0.96	0.95	0.93	0.94	0.92	0.90	0.89	0.88	0.94	0.96	0.95	0.96	0.93				

Cálculo das razões (Ce/Ce*) e (Eu/Eu*), amostra PB-123b												
Element	AP-01	AP-02	AP-0340um	AP-05	AP-04c	AP-04b	AP-06	AP-07c	AP-07b	AP-09	Média	Desv P.
La	10619.42	8633.03	7751.99	8451.94	9453.69	9761.76	6714.93	8596.98	6788.86	7145.29	8391.79	1241.6
Ce	9922.97	7144.01	5865.28	8306.47	8871.59	9349.80	6750.85	9224.24	8321.32	6132.83	7988.94	1353.2
Pr	7743.95	5085.09	4309.68	6678.25	6996.28	7347.74	5394.22	7134.97	6528.46	4597.13	6181.58	1165.2
Ce*	9068.42	6625.69	5780.02	7512.93	8132.69	8469.17	6018.45	7831.93	6657.39	5731.30	7182.80	1125.2
Ce/Ce*	1.09	1.08	1.01	1.11	1.09	1.10	1.12	1.18	1.25	1.07	1.11	0.1
												-
Sm	2494.74	1383.41	1513.88	2163.62	2286.17	2461.02	1738.81	2282.88	2244.39	1349.77	440.00	632.6
Eu	1038.28	1014.72	764.83	1066.21	1087.93	1192.53	848.51	1085.18	1128.05	772.53	151.84	293.0
Gd	1036.04	564.34	661.27	901.54	951.72	1011.25	711.23	917.17	930.64	554.26	257.67	243.6
Eu*	1607.68	883.58	1000.54	1396.63	1475.06	1577.57	1112.07	1447.00	1445.24	864.94	1281.03	271.7
Eu/Eu*	0.65	1.15	0.76	0.76	0.74	0.76	0.76	0.75	0.78	0.89	0.80	0.1

TABELA COMPLETA – RESULTADOS DATAÇÃO U-Pb – ANEXO IV

Spot	204Pb /206Pb ±%	207Pb /206Pb ±%	208Pb /206Pb ±%	206Pb /238U ±%	% 206Pb _c	ppm U	ppm Th	4-corr ppm 206Pb*	4-corr ppm 208Pb*	232Th /238U ±%	(1) 206Pb /238U Age	(2) 206Pb /238U Age	(3) 206Pb /238U Age	(1) 207Pb /206Pb Age	(1) 208Pb /232Th Age	(2) 208Pb /232Th Age	(3) 207Pb /206Pb Age	% Dis- cor- dant
PB123-10.1	1.1E-3	26	0.0775	6.5	0.43	2.1	0.310	1.1	1.4	1.31	0.49	571 ±8	570 ±9	574 ±10	558 ±21	550 ±24	799 ±296	+12
PB123-10.2	2.6E-3	18	0.0979	11.0	0.64	1.8	0.308	2.3	4	1.92	0.45	575 ±9	575 ±11	586 ±12	547 ±22	546 ±31	1068 ±702	+2
PB123-12.1	2.3E-3	19	0.0922	10.1	0.40	2.1	0.313	2.5	4	1.13	0.50	576 ±9	576 ±10	582 ±10	542 ±31	541 ±44	897 ±374	+1
PB123-2.1	2.5E-3	18	0.0963	9.4	0.78	4.1	0.327	1.9	3	2.4	0.46	576 ±9	576 ±11	578 ±19	572 ±29	572 ±32	688 ±362	+0
PB123-11.1	1.9E-3	20	0.0882	7.0	0.52	4.2	0.337	1.1	3	1.6	0.49	581 ±9	580 ±9	589 ±14	642 ±302	550 ±32	980 ±824	+10
PB123-7.1	1.5E-3	23	0.0811	2.3	0.67	1.8	0.332	1.9	3	2.1	0.46	584 ±9	584 ±8	600 ±14	575 ±202	548 ±14	1250 ±823	-2
PB123-5.1	1.3E-2	8	0.2491	5.3	0.95	3.0	0.378	1.0	3	1.9	0.47	594 ±22	593 ±22	593 ±37	653 ±885	594 ±54	583 ±2822	+9
PB123-13.1	1.8E-3	40	0.0868	9.5	0.68	5.0	0.319	1.1	4	2.4	0.45	597 ±16	596 ±16	618 ±27	626 ±489	551 ±39	1414 ±2100	+5
PB123-9.1	1.8E-3	21	0.0872	5.5	0.74	1.7	0.324	1.1	3	2.2	0.45	598 ±10	597 ±10	603 ±16	657 ±260	583 ±18	901 ±1223	+9
PB123-3.1	2.0E-3	19	0.0909	10.0	0.73	1.7	0.324	3.0	4	2.5	0.44	600 ±9	599 ±11	612 ±14	649 ±389	576 ±18	1123 ±1018	+8
PB123-1.1	2.3E-3	21	0.0937	10.0	0.59	3.5	0.346	1.4	3	1.5	0.52	605 ±11	605 ±12	622 ±16	633 ±428	557 ±29	1298 ±918	+5
PB123-6.1	1.5E-3	34	0.0831	8.2	0.43	3.4	0.326	1.5	6	2.3	0.43	608 ±9	607 ±9	614 ±11	650 ±362	581 ±36	919 ±401	+7
PB123-4.1	4.6E-4	22	0.0668	1.3	0.41	2.3	0.325	0.6	12	4.7	0.36	611 ±6	611 ±6	620 ±9	609 ±63	572 ±15	1011 ±241	-0
PB123-8.1	1.3E-3	23	0.0795	7.2	0.62	1.7	0.321	1.0	4	2.4	0.44	619 ±9	619 ±9	636 ±13	628 ±260	577 ±17	1291 ±602	+1
PB123-8.2	2.2E-3	19	0.0929	8.9	0.44	2.4	0.252	1.0	5	1.7	0.49	621 ±9	621 ±10	625 ±11	626 ±379	606 ±31	779 ±374	+1

Errors are 1-sigma; Pb_c and Pb* indicate the common and radiogenic portions, respectively.

Error in standard calibration was 0.21% (not included in above errors but required when comparing data from different mounts).

(1) Common Pb corrected by assuming 204Pb.

(2) Common Pb corrected by assuming 206Pb/238U–207Pb/235U age-concordance

(3) Common Pb corrected by assuming 206Pb/238U–208Pb/232Th age-concordance

7corr 208Pb* /232Th ±%	(1) 238U /206Pb* ±%	(1) 207Pb* /206Pb* ±%	(1) 208Pb* /238U ±%	(1) 207Pb* /235U ±%	(1) 206Pb* /238U ±%	err corr	(3) 238U /206Pb* ±%	(3) 207Pb* /206Pb* ±%	(3) 207Pb* /235U ±%	(3) 206Pb* /238U ±%	err. corr.
0.0276	4.4	10.79	1.51	0.06118	11.0	0.1	10.73	1.9	0.85	14.7	0.36
0.0274	5.8	10.71	1.66	0.05960	22.5	0.1	10.51	2.2	0.98	35.5	0.31
0.0271	8.2	10.70	1.60	0.05946	19.7	0.1	10.58	1.8	0.90	16.0	0.21
0.0287	5.6	10.70	1.71	0.05926	20.0	0.1	10.66	3.4	0.81	183.7	0.79
0.0276	5.9	10.60	1.62	0.06109	14.1	0.1	10.46	2.4	0.95	42.0	0.66
0.0275	2.5	10.55	1.60	0.05921	9.3	0.2	10.26	2.4	1.10	43.5	0.60
0.0298	9.3	10.35	3.85	0.06139	41.2	0.1	10.38	6.6	0.79	133.2	0.51
0.0276	6.7	10.31	2.89	0.06064	22.7	0.1	9.94	4.6	1.24	112.9	0.69
0.0293	3.0	10.29	1.73	0.06151	12.1	0.1	10.19	2.7	0.93	60.7	0.51
0.0288	4.4	10.25	1.60	0.06127	18.1	0.1	10.05	2.4	1.06	52.0	0.40
0.0278	6.3	10.16	1.84	0.06084	19.9	0.1	9.87	2.7	1.18	48.6	0.56
0.0289	6.1	10.11	1.56	0.06130	16.8	0.1	10.01	1.8	0.96	20.3	0.47
0.0287	2.6	10.06	1.10	0.06014	2.9	0.4	9.91	1.5	1.01	12.7	0.57
0.0289	3.5	9.92	1.49	0.06067	12.1	0.1	9.64	2.2	1.20	31.9	0.45
0.0304	6.8	9.88	1.55	0.06063	17.6	0.1	9.83	1.8	0.91	18.3	0.30

Universidade de São Paulo

Instituto de Geociências

Trabalho de Formatura (Monografia)

Caracterização das condições de cristalização de um magma com base no estudo de seus minerais acessórios. Exemplo do Sienito Pedra Branca, MG.

TF-18/39

Victor Brugnera Camassari de Gonzaga

Orientador: Professor Valdecir de Assis Janasi

São Paulo, 2018